CRDS-FY2012-OR-01

海外動向報告書

中国の科学技術力について

～世界トップレベル研究開発施設～

平成24年6月

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

はじめに

本報告書は、中国が世界に誇るトップレベルの研究開発施設を訪問し、その状況を調査したものである。

中国は、2000 年に入るまでは、科学技術においてそれほど目立った存在と考えられていなかった。ところが、改革開放政策を受けた経済発展が 1990 年代に始まり、21 世紀に入ってそれが加速することにより、科学技術についても大きな変化がみられるようになった。ただ、中国は地理的にも人口的にも大国であり、また欧米流の情報公開の進展が少し遅れていることもあって、他の国のようになかなか全体像が見えてこない。

国の科学技術力を示す科学論文、特許などの指標でみると、中国の科学技術力の進展は著しいと考えられるが、他方日本の専門家に個別の分野における中国の科学技術レベルを尋ねると、余り高い評価にはならない場合が多い。

そこで、独立行政法人科学技術振興機構・研究開発戦略センターでは、私が中心となって二度にわたり、主としてマクロ的な指標を中心に中国の科学技術力の調査を行ってきた。第一回目は 2008 年 9 月に調査し、「中国の科学技術力について」という冊子を刊行した。第二回目は、2009 年 11 月に第一回目の「中国の科学技術力について」の改訂を行い、これを「中国の科学技術力について　総論編」として刊行するとともに、これに加えて原子力・宇宙・海洋などのビッグプロジェクトについても調査を行い、「中国の科学技術力について　ビッグプロジェクト編」として刊行した。

第二回目の調査終了から二年以上が経過しており、その間の中国の科学技術の変化は著しく、そろそろ改訂の必要があると考えられる。しかしこれまでの二度の経験からして、中国の科学技術力を知るためには、従来の調査の延長線として色々な指標を確認することも重要と考えられるが、それだけでは中国科学技術力についての全体像に迫ることが難しいのではないかと考えた。そこで今回調査方法を変更し、中国の科学技術現場を調査することにより、より納得できるような全体像に迫れないかと考えた次第である。

現場の調査を行うとなると、これまでのようにデータを集め、それに基づいて分析していた手法と違い、現場訪問のアレンジ、現場訪問のための旅費の調達、現場訪問を行うスタッフの確保など、資金と要員の確保が重要となる。幸いにして、私が属する科学技術振興機構の中村理事長には、この調査の重要性を認識いただき、必要な経費の支出を認めていただいた。スタッフは、研究開発戦略センターの内部や兄弟組織である中国総合研究センター更には科学技術振興機構中国事務所から募るとともに、文部科学省や同省所管の研究開発独立行政法人からも協力いただいた。

調査対象としては、中国が現時点で世界トップレベルとして誇る科学技術上の施設や装置、あるいは研究を中心に、十二のテーマを取り上げた。テーマ選定はそれほど厳密な基準で行ったものではなく、中国政府や研究機関が、自ら公表している内容などを参考に選定した。従って、選定漏れがあることは十分に考えられる。その意味で、今回の調査はスタートにすぎず、これを今後数度にわたり繰り返していくことが肝要と考えられる。

調査の方法は、中国の現地を訪問してその施設や研究を視察するとともに関係者のイン

タビューを行い、これと並行して日本にある同様の施設や日本で行われている研究を視察し、日本の関係者のインタビューを行い、中国での視察やインタビューの結果をより客観的に評価分析するというものである。

今回の調査は、中国の科学技術関係で初めて行った比較的大規模なものであると思われるので、我々がどのような意図を持ってこの調査を行ったかを、ここで改めて確認しておきたい。

中国の科学技術力を調査し、正確な科学技術力の実態を知りたいと思うのは、まず、中国の現在の科学技術力への敬意の表明と考えている。中国の科学技術が低迷していた時代は別として、中国の科学技術が世界に大きく貢献しつつある現在、中国の科学技術力を知りこれを正当に評価することは、日本の科学技術の振興にとって極めて重要と考えられる。日本は、科学技術だけでなく政治経済その他の色々な面で、より進んだ国の状況を調査把握しそれを日本に導入したり参考としたりしてきた経緯がある。科学技術は欧州由来であるが故に、欧州主要国やその後継者である米国を参考としつつ、日本の科学技術は発展してきた。中国は科学（Science）の世界では、既に欧州諸国や日本を追い越し米国を追撃していると考えられ、この中国の状況を正確に把握することは日本にとって有益な示唆を与えることになると考えている。

さらにもう一つ重要な観点は、科学技術における日本と中国の協力の強化拡大である。科学技術には国境はなく、米国は世界中から人材を集めて科学技術活動を行っているし、欧州諸国は欧州として一体となって科学技術協力を行っている。一方日本は、個々のつながりをもとに米国や欧州諸国と協力を行っているが、どちらかというと国内を中心に日本単独で科学技術の振興に当たってきた感が強い。しかし、巨大な財政赤字からくる予算の伸び悩みや、少子化からくる将来の人材不足を考えると、中国をはじめとする近隣アジア諸国との協力の強化拡大が、今後の日本にとって重要となってくることは間違いないと考えられる。その時に協力のベースとして重要となるのは、協力相手の状況を十分に理解することである。この協力のベース作りに、今回の調査は大きな貢献をすると考えている。

今回調査の結果であるが、一つ一つの研究施設・装置などは、既に他の日本人により視察がなされたり、報告が出されたりしてきたものもあり、それほど目新しい情報が得られたわけではない。しかし、ほとんど同じ時期に、同じ手法で調査を行い分析を行ったことが、今回調査の特徴である。これまでの様々な指標で浮かび上がる中国の科学技術力を、肉付けしていく調査であったと考えている。その意味で、今後の中国科学技術動向調査の出発点となるものができたと考えているが、読者の率直なご批判ご意見を仰ぎたいと考えるものである。

今回の調査スタッフを代表して、

平成 24 年 6 月
独立行政法人科学技術振興機構　研究開発戦略センター
上席フェロー（海外動向ユニット担当）
林　　幸　秀

目　次

はじめに…… 1
第一章　スパコン「天河 1A」「星雲」…… 7
1. 世界のスパコン開発 …… 7
2. 中国のスパコン開発 …… 7
3.「天河 1A」視察 …… 9
4.「星雲」視察 …… 13
5. 今後の日中協力 …… 18
6. 所感 …… 19
7.「京」「天河 1A」「星雲」の比較 …… 20
8. 参考文献等 …… 20
第二章　有人潜水調査船「蛟竜」…… 21
1. 世界の有人潜水調査船 …… 21
2. 中国の海洋調査研究 …… 21
3.「蛟竜」視察 …… 22
4.「蛟竜」と「しんかい 6500」の比較 …… 27
5. 今後の課題 …… 29
6. 今後の日中協力 …… 29
7. 所感 …… 29
8. 参考文献等 …… 30
第三章　核融合研究施設「EAST」 …… 31
1. 世界の核融合研究 …… 31
2. 中国の核融合研究 …… 32
3. EAST 視察 …… 32
4. EAST の評価と今後の核融合計画 …… 36
5. 中国の核融合研究の課題 …… 38
6. 今後の日中協力 …… 41
7. 参考文献等 …… 42
第四章　太陽エネルギー「太陽バレー」「サンテックパワー」…… 43
1. 世界の太陽エネルギー利用 …… 43
2. 中国の太陽エネルギー利用 …… 43
3. 現地訪問（その 1 ー太陽バレー） …… 46
4. 現地訪問（その 2 ーサンテックパワージャパン） …… 54
5. 参考文献等 …… 59
第五章　エコシティ…… 61
1. エコシティの意義 …… 61
2. 中国のエコシティ …… 61
3. 現地視察（その 1 ー上海東灘・陳家鎮生態城） …… 62
4. 現地視察（その 2 ー中新天津生態城） …… 66

5. 現地視察（その 3 ー曹妃甸国際生態城） …… 71
6. 現地視察（その 4 ー重慶・両江新区） …… 74
7. 中国エコシティに関する総括評価 …… 77
8. 日本の技術導入の可能性 …… 79
9. 参考文献等 …… 80
第六章　BGI …… 81
1. ゲノム解読の重要性 …… 81
2. 中国のゲノム研究 …… 82
3. BGI 視察 …… 82
4. BGI の特色 …… 89
5. BGI の成功要因 …… 91
6. BGI に対する批判 …… 93
7. 今後の課題と対応 …… 96
8. 日本のとるべき方策 …… 97
9. 所感 …… 98
10. 参考文献等 …… 99
第七章　iPS 細胞研究 …… 101
1. 世界の iPS 細胞研究 …… 101
2. 中国の iPS 細胞研究 …… 101
3. 研究所訪問（その 1 ー中国科学院動物研究所） …… 102
4. 研究所訪問（その 2 ー北京大学生命科学学院） …… 107
5. 研究所訪問（その 3 ー北京生命科学研究所） …… 110
6. 中国 iPS 細胞研究の特徴 …… 113
7. 日本側から見た中国 iPS 細胞研究の特徴 …… 114
8. 今後の日中協力 …… 118
9. 中国の iPS 研究の将来性、課題 …… 121
10. 参考文献等 …… 122
第八章　手術ロボット …… 123
1. 世界の手術ロボット開発 …… 123
2. 中国の手術ロボット開発 …… 124
3. 研究所訪問（その 1 ー中国科学院瀋陽自動化研究所） …… 125
4. 研究所訪問（その 2 ー重慶新橋医院） …… 127
5. 研究所訪問（その 3 ー上海交通大学医学院） …… 129
6. 中国の手術ロボット開発についての考察 …… 132
7. 今後の日中協力 …… 133
8. 参考文献等 …… 134
第九章　光学天文台「LAMOST」 …… 137
1. 調査目的 …… 137
2. LAMOST 視察 …… 137
3. 鏡面等の構成 …… 140
4. 観測ミッション …… 143

5. 運用 …… 144
6. 他の望遠鏡との比較 …… 145
7. 今後の日中協力 …… 147
8. 参考文献等 …… 148
第十章　放射光施設「SSRF」 …… 149
1. 放射光施設の意義 …… 149
2. 中国の放射光施設 …… 149
3. SSRF 視察 …… 150
4. 世界主要拠点との比較 …… 155
5. 科学技術上の評価 …… 156
6. 中国の科学技術政策関係者のコメント …… 157
7. 施設の将来性および課題 …… 158
8. 今後の日中協力 …… 159
9. 参考文献等 …… 159
第十一章　強磁場施設 …… 161
1. 世界の強磁場科学 …… 161
2. 中国の強磁場科学 …… 163
3. 強磁場科学センター（定常磁場）視察 …… 163
4. 国家パルス強磁場センター視察 …… 167
5. 強磁場科学における中国の課題 …… 171
6. 参考文献等 …… 173
第十二章　日中共同研究拠点及び日本企業の中国拠点 …… 175
1. 調査の概要 …… 175
2. 東京大学と中国科学院生物物理研究所との共同研究 …… 175
3. 東京大学と中国科学院微生物研究所との共同研究 …… 178
4. ソニー中国研究院訪問 …… 180
5. 日立（中国）研究開発有限会社訪問 …… 184
6. 花王（中国）研究開発センター訪問 …… 186
7. 所感 …… 188
第十三章　今回の調査での雑感 …… 189
1. 研究人材 …… 189
2. 研究環境・研究手法 …… 190
3. 政治、地方政府 …… 192
4. 日本との対比 …… 192
5. 中国の科学技術情報の不足 …… 193
6. 日中科学技術協力 …… 194
7. 中国の社会 …… 194
おわりに …… 196
筆者紹介 …… 198

第一章　スパコン「天河 1A」「星雲」

科学技術振興機構　研究開発戦略センター
フェロー（システム科学ユニット）
豊　内　順　一

1．世界のスパコン開発

科学技術の進展にとって、今やスーパーコンピュータ（以下「スパコン」と略す）は、なくてはならない重要な装置となっている。スパコンは、素粒子・天文研究、気象予報、温暖化予測、津波等の災害予測、創薬、半導体材料開発、自動車・航空機の構造解析・空力解析など幅広い分野において、理論、実験・観測に次ぐ第三の手法として、今日の研究開発には欠かせない基盤ツールである。スパコンの性能向上が重要な理由は、従来のスパコンを複数台並べたとしても、複雑で大きなサイズのデータを扱う、半導体材料開発や自然現象などの大規模シミュレーションにおいては、現実的な時間内（例えば、長くても数日）で高い精度の問題を解くことは不可能となる、すなわち一定能力以上のスパコンを持っていない国は、これらの分野の最先端の研究開発で、大きく後れをとることになる。

アメリカと日本は、スパコンによるシミュレーション能力が国際競争力の源泉であるとの認識に立ち、1960 年代から国策によってスパコンのハードウェアとソフトウェアを開発するための計算機科学技術と、スパコンの能力を活用するための計算科学との双方に注力してきた。

一方で欧州各国は、スパコンの重要性は認識しつつも、1980 年代以降はスパコンのハードウェアの研究開発は行わず、米日から購入するという割り切りを行って、シミュレーションソフトやコンパイラなどの研究開発に注力してきた。自分たちの応用分野の特性を見極め、米日の製品を取捨選択した上で、ソフトウェアを組み合わせて、計算機能力を有効に引きだせる環境の構築を目指している。

2．中国のスパコン開発

（1）沿革

これまでは自国の技術と製品を中心にスパコンを構築できたのは、米日の二国だけであったが、近年、中国が自主技術をうたってスパコン分野でも実績を挙げつつある。

中国が、スパコンの研究開発に注力している背景には、1986 年 3 月に鄧小平国家主席の決断で実施が決定された「863 計画」がある。863 計画とは「国家ハイテク研究プログラム」の通称であり、中国政府自ら研究を進める主体計画の一つとして、ハイテク産業技術の開発を目的とした応用技術研究開発プログラムである。その対象の一つとしてスパコンが選定された。

1990 年以降、中国 5 カ年計画の一環としてスパコンの研究計画も策定されており、第 10 次 5 カ年計画（2001 ー 2005 年）では「テラ FLOPS[1] スパコンとその環境の開発」を

[1] FLOPS とは 'floating point operations per second' の略でコンピュータの処理能力の単位。1 秒あたりに行える浮動小数点数の演算回数を表す。この値が大きいほど演算速度が速い。

目標に挙げている。第 11 次 5 カ年計画（2006 ー 2010 年）の目標は「ペタ FLOPS スパコンとグリッドコンピューティング環境の強化」であり、より具体的には「スパコン研究開発の積極的推進、1 テラ FLOPS スパコンの産業化、高性能 PC とハイエンドサーバの発展に注力」と、研究と産業の両輪でスパコンの研究開発を推進することがうたわれている。

（2）現状と計画

これらの方針を受けて、現在は天河（銀河）の国防科技大学、星雲（曙光）の中国科学院、そして神威の国家並行計算机工程技術研究中心の三者が、スパコンの開発競争を行っている。中国のスパコン研究開発の主だった成果を列挙すると、1983 年の国防科技大学による「銀河 I 号」（0.1 ギガ FLOPS）に始まり、10 年後の 1993 年に「銀河計算機 II 型」（1 ギガ FLOPS）、さらに 1995 年に中国科学院より「曙光 1000」（2.5 ギガ FLOPS）、1999 年に国家並行計算机工程技術研究中心より「神威 I」（384 ギガ FLOPS）が登場した。その後も銀河シリーズは、「銀河五代」（2007 年）までリリースされる。また、2004 年には上海スパコンセンターの「曙光 4000A」（11.3 テラ FLOPS）が、スパコンのベンチマークプログラム LINPACK の実行性能順位を年 2 回発表しているプロジェクト「TOP500」ランキングで、初めて TOP10 入りした。

そしてついに 2010 年 11 月には、国防科技大学の「銀河」シリーズの流れをくむ天津スパコンセンターの「天河 1A」が、「TOP500」のランキングにおいて 2.57 ペタ FLOPS で首位に立ち、深圳スパコンセンターの「星雲」も 1.27 ペタ FLOPS で世界第 3 位につけた。2011 年 6 月に日本の理化学研究所の「京」が、8.16 ペタ FLOPS という「天河 1A」の 3 倍の性能で首位の座を奪うものの、中国のスパコンが半年間だけでもトップを獲得したことは非常に印象的な出来事であった。

なお、現在進行中の第 12 次 5 カ年計画（2011 ー 2015 年）では、2015 年末までにさらに高性能の次世代スパコン「天河 2 号」を開発し、演算処理速度を毎秒 10 京回（100 ペタ FLOPS）以上にするとしている。これは日本の「京」の 10 倍以上の速度であり、世界一の奪還を明確に目標に掲げている。

（3）今回の調査について

これまで、「天河 1A」や「星雲」の仕様の詳細や研究開発体制、運用の実態などに関する情報はあまり明確に報道されず、断片的な情報しか流れていなかった。特に中国曙光公司開発の「星雲」は、「天河 1A」に比しても情報が少なかった。

今回、天津スパコンセンターと深圳スパコンセンターを訪問し、「天河 1A」と「星雲」の性能、利用状況、運用実態等について「京」と比較しつつ調査するとともに、担当者のインタビューなどから施設・研究の将来性、課題そして今後の日中協力の可能性について検討した。

3.「天河 1A」視察

（1）訪問の概要

①訪問日時：2012 年 3 月 7 日 15:10 ー 16:30
②訪問場所：天津市　天津スパコンセンター（国家超級計算天津中心）
③日本側訪問者：豊内順一　　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　フェロー
　　米山春子　　科学技術振興機構　中国総合研究センター　フェロー
④中国側対応者：Jun Luo　　天津スパコンセンター副主任（運用担当）
　　Dr.Harry Zhu　天津スパコンセンター副主任（技術担当）　他

（2）施設の概要

天河 1A (Tianhe-1A) が設置されている天津スパコンセンター (国家超級計算天津中心) は、天津市中心部から電車で 50 分ほど離れた天津浜海新区のリサーチパークにある。パークの敷地は非常に広大で、まだ更地も多いが、複数の新しいビルが建設中であり、今後の発展が期待される。

写真 1－1　天津浜海新区のリサーチパーク

© 豊内順一

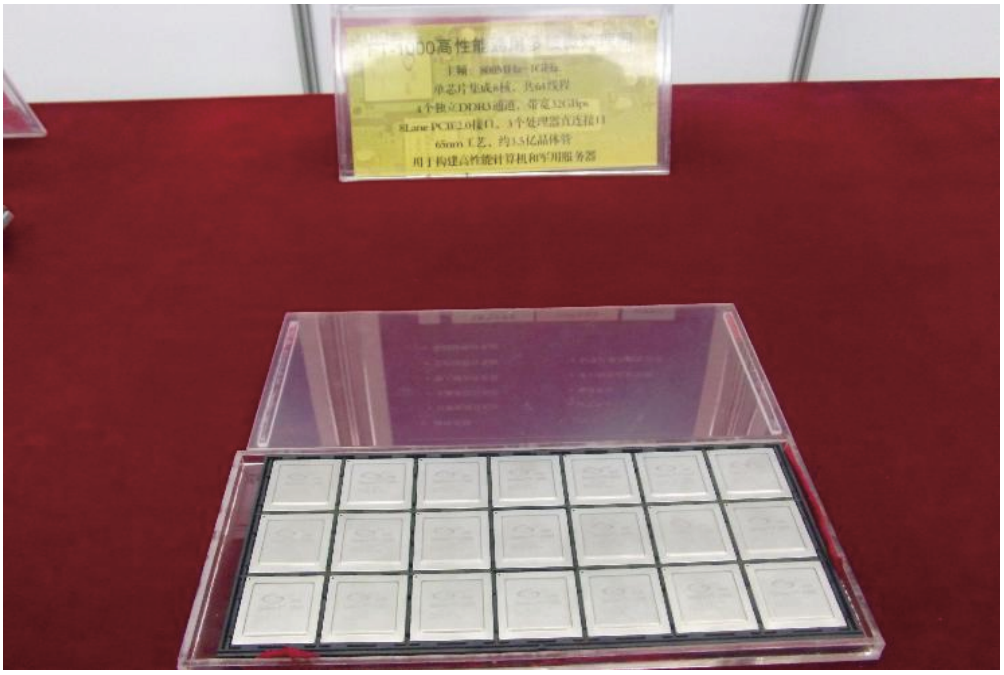
今回、天津スパコンセンター建屋の 1 階と 2 階を見学した。1 階に天河 1 A 本体のあるサーバールームがあり、2 階には大会議室や見学者向けのプレゼンルームが配置されている。1 階のサーバールームには天河 1 A 本体と電源、ファイルサーバーなどの計算機設備が設置されていた。冷却方式は水冷と空冷（天井から冷気を流すエアフロー方式）の併用で、空気と水の冷却設備と変電設備は別の建屋にあるとのこと（今回は見学できず）。プレゼンルームには、見学者向けに天河 1 A を構成するチップやボードなどのハードウェア、応用アプリケーションのパネルが展示してあり、紹介ビデオなどを見ることが出来た。

写真 1－2　天津スパコンセンター外観

© 豊内順一

天河 1A のプロセッサの構成は、Intel の CPU（Xeon X5670）14336 個に、アクセラレータとして NVIDIA の GPU（M2050）7168 個、そしてインターコネクト用の Galaxy FT-1000 を 2048 個という 3 種類からなる。このうち CPU と GPU は言うまでもなく米国製であり、Galaxy FT-1000 のみが中国が独自開発したプロセッサである。

写真 1－3　国産プロセッサ　Galaxy FT-1000



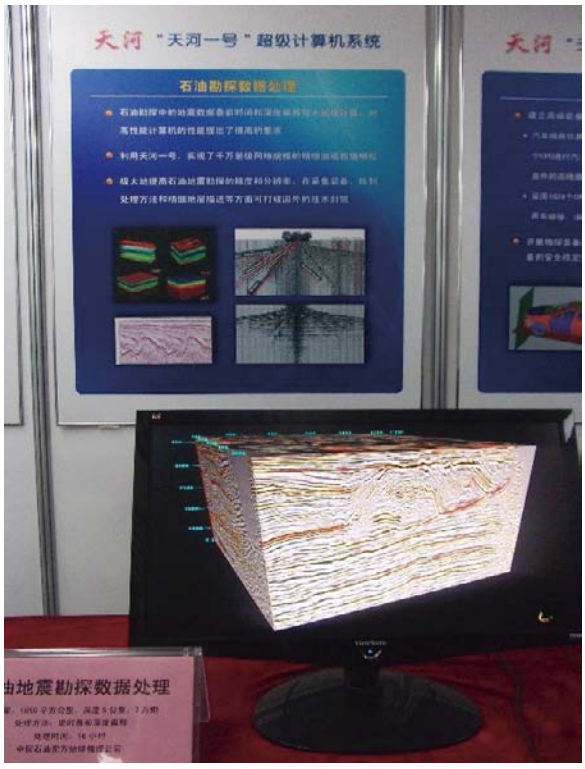
© 豊内順一

ここでいうアクセラレータとは、計算速度を加速するためにCPUにアタッチして使用する協調プロセッサを意味する。スパコンには、画像処理用のGPU（Graphics Processing Unit）の演算資源を、本来の目的以外、すなわちアプリケーションの演算に利用しているものがある。現時点では、消費電力・設置面積・予算が限られた条件下でスパコンの計算性能を上げるには、GPUをアクセラレータとして使うことが最も効率的な手段と考えられ、一つの大きな流れとなっている。また、スパコンのような大規模並列計算機では、CPUやGPUからなる計算ノード間の相互接続ネットワーク（インターコネクト）も、非常に重要な役割を果たす。ネットワークとその制御機能が十分な性能を持っていないと、CPUやGPUが単体で高い性能を持っていても、システム全体としての性能を発揮できない。

（3）応用アプリケーション

天河1Aはハードウェアとしては完成しているので、今後の主なる研究対象は応用アプリケーションの拡充である。プレゼンルームの応用アプリケーションのパネルには、「石油探査」「製造技術（強度･挙動のシミュレーション）」「医療バイオ」「衛星画像処理」「核融合シミュレーション」「航空・宇宙機熱流体シミュレーション」「気象予測」「金融リスクシミュレーション」「海洋環境シミュレーション」「CGアニメーションレンダリング」「基礎科学（新材料、宇宙）」があった。ただし、これらのうち天河１Aの本来の計算パワーを必要とする（CPUのみならず、アクセラレータ（GPU）まで用いる）アプリケーションは「医療バイオ（タンパク質解析など）」「新材料（シリコン）」「流体シミュレーション（乱流）」などごく一部であった。

写真１－４　天河の応用アプリケーション事例パネル「石油探索」



© 豊内順一

（4）活用状況

利用者は国内の学生を含む研究者、企業など。申請すれば誰でも使える。資金の潤沢な研究室からは所定の費用を貰っているが、お金のない学生は無料で利用可能。また、混んでいないので、基本的に待ち行列はないとのこと。ただし、中国外の研究者、例えば日本から使えるかという質問に対しては、技術的には可能だがそういう状況は想定していなかったということであり、おそらく利用する計算パワーに応じた使用料を払えば可能だろうとの回答であった。

（5）施設や研究の特色

施設の特長として強調していたのは、非常にコストパフォーマンスのよい施設であることである。天津スパコンセンターは、もとは別の目的で建設された建物を流用したとのことで、サーバールームも元の床から数十 cm 床上げしただけのフリーアクセスのフロアであった。

また消費電力が少ないという特長を有するとの説明もあった。確かに、天河のようなCPU に加えて GPU をアクセラレータとして用いるハイブリッド型のスパコンでは、その演算性能のかなりの割合が GPU に依存しており、演算性能あたりの消費電力は CPU だけのシステムに比べて相対的に少ない。しかし現状のような利用状況では、そもそも GPU はほとんど稼働していないと推察され、現時点の消費電力が少ないのも当然と言える。

写真 1－5　サーバールームの天河 1A 本体

© 豊内順一

（6）日本側の専門家の分析

アクセラレータ（GPU）を演算性能の主体に置いたシステムであり、低価格、低消費電力で演算性能を稼ぐには最適なシステムである。ただし、こういったハイブリッド型のシステムの利用や運用には比較的高いスキルを必要とし、現時点の利用状況から察するに、まだ効率的な活用が行われている状態には無いように推測される。

また、誤解を恐れずに言えば、LINPACK 性能を低価格で確保することに主眼においた、TOP500 で 1 位を取るためのシステムとも解釈できる。実行するアプリケーションについても、一般論として各国で重要視されている分野をあげているだけで、まだ、有望なアプリケーション対象も決まっていないように考えられる。このため、「京」のようにアプリケーションからの要求によってスペックが決められたシステムと異なり、ハードウェアは作ったが何をして良いのか手探り状態と言える。

ただし、中国のスパコンの方向性として GPU 利用に主眼を置くと戦略的方向性が決まった場合、今後アプリケーション分野においても、かなりの成果が出てくるものと考えられる。一方で、将来、天河 2 号が稼働した場合には、天河 1A は運用停止となる可能性も考えうる。

（7）将来性および課題

天津スパコンセンター自体は、基本的に天河 1A を保守・運用しているだけの施設であり、研究者は外部からネットワーク経由でスパコンを利用している（大きなジョブを走らせる時には、直接訪問する場合もあるとのこと）。そのため同センターに常駐している職員は十数名のみである。確かに訪問時の様子では、研究者や学生らしい人間の姿はほとんど見なかった。

紹介された応用アプリケーションは、石油探査、バイオメディカル、アニメデザイン、気象予報、金融リスク分析など、事前のネットなどを用いた調査でも判明していたものがほとんどで、新しい情報はあまり得られなかった。

既に高い計算能力を誇るハードウェアが完備されているのだから、課題は運用面であり、特に利用率の向上であろう。そのためには、有望なアプリケーションの探索が必須である。とりわけ GPU の性能をフルに活用する応用がなければ、宝の持ち腐れと言える。そのため、研究面では共通的に利用できるライブラリなどの開発など、より利用しやすい環境の整備が喫緊の課題と考える。

また、第 12 次 5 カ年計画で、100 ペタ FLOPS の「天河 2 号」を 2015 年末までに開発することが目標とされているため、天河 2 号の開発の進捗状況を質問したが、中国側対応者は詳細な計画や状況についての情報を持っていないようだった。ただ、天河 2 号が設置される場所は、天津スパコンセンターではないことが確実とのことであった（広州との情報がある）。

4.「星雲」視察

（1）訪問の概要

①訪問日時：2012 年 3 月 8 日 14:20 ー 15:20
②訪問場所：深圳市、深圳スパコンセンター
③日本側訪問者：豊内順一　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　フェロー
　　米山春子　科学技術振興機構　中国総合研究センター　フェロー
④中国側対応者：Dr.James Zheng 技術部門　プロジェクトマネージャー
　　Patrick Liu　技術部門　プロジェクトマネージャー、他

写真１－６　深圳スパコンセンターで
左から　Liu（中）、米山（日）、豊内（日）、Zheng（中）

© 豊内順一

（2）施設の概要

星雲（Nebulae）が設置されている深圳スパコンセンター（国家超級計算深圳中心）は、深圳市南山区の北部の北京大学や清華大学の研究院などが近隣に並ぶ学園エリアにある。同センターは 5 階建てと 9 階建ての新しい立派な建物で、中国科学院深圳先端技術研究院の敷地と隣接する形で建設されている。2 つの棟を結ぶ建屋の 1 階ロビー、および星雲の本体が設置されたサーバールームとシステムコントロール室（監視室）がある 5 階建ての建屋の 2 階が見学可能だった。見学はできなかったが、同じ建屋の中に、精密空調装置、冷水設備、冷却塔なども収められているとのこと。また、電力供給に無停電電源装置を採用しており、2874 セットの電池が装備されている。

同センターの正式な完成と検収合格は 2012 年 1 月で、星雲自体も 2011 年 11 月に稼働を開始したばかりのため、まだ見学用の設備やパネルは十分ではなかった。その一方で、天津スパコンセンターと異なり、サーバールームには多くの研究者や技術者が作業を行っていた。彼らは、基本的にはこのセンターの職員の研究者や技術者であり、ライブラリの開発や、パッケージソフトの設定、セキュリティ対策などを行っているとのことであった。また保守専門の職員もシステムコントロール室に詰めていた。

写真１－７　深圳スパコンセンター正面入り口

© 豊内順一

写真１－８　サーバールームのある５階建てビル

© 豊内順一

写真１－９　サーバールーム（NEBULAE と書かれている）

© 豊内順一

写真１－10　サーバールームで作業する研究者・技術者

© 豊内順一

さらなるハードウェアの拡張計画はあるか？という質問に対しては、現状では星雲の能力は 10% も使われていないので、これ以上の拡張予定はないとのことであった。ただ、建物の中には２階のサーバールームと同じ部屋が３階と４階にあるので、必要があればハードウェアを３倍の規模にまですることは可能であり、電力や空調、冷水の設備も３倍のハードウェアを支える容量があるとのことである。

（3）応用アプリケーション

新エネルギー開発、新物質・材料の研究開発、自然災害の予知、天気予報、地質探査など幅広い分野のアプリケーションを想定している。また、科学計算だけでなく、自治体向けの計算機インフラとしての役割も計画しているとのことであった。

（4）活用状況

星雲は正式稼動を開始したとはいえ、現状はまだ準備フェーズであり、多くの人に使ってもらえる環境を整えている段階にあり、上述の通り能力の 10% も使われていないとのことであった。

利用者は天河 1A などと同様に、国内の学生を含む研究者、企業などである。加えて、自治体や深圳市民向けのサービスも予定している。現状は Web から申請すれば誰でも使える状態であり、専門分野の研究者用の数値計算などのパッケージソフトも充実している。中国外の研究者、例えば日本から使えるかという質問に対しては、技術的には可能だが、前例はなく、やはり海外の人でも、ここに来て使ってもらうことになるだろうとのことであった。

（5）施設や研究の特色

星雲はシステムとしては、曙光信息産業有限公司の製品である曙光 5000 ／曙光 6000 シリーズで構成されており、CPU として後述する国産の龍芯（LOONGSON）プロセッサの最新タイプが用いられているとのことであった。天河 1A は FT1000 と NRC というインターコネクト用のプロセッサのみが国産だったが、龍芯プロセッサは全て中国発の技術を用いていることが強調されている。高性能な龍芯が開発されていることで、米国に追随するため CPU の研究にも注力されていることが分かる。しかし、星雲の性能の大部分は、天河 1A と同様に Intel 社の Xenon CPU と NVIDIA 社の GPU という構成である。

ちなみに、中国科学院コンピュータ技術研究所が 2002 年から開発を続けている龍芯プロセッサは、Intel 社や AMD 社のチップで採用されている x86 の命令セットではなく、MIPS Technologies 社の命令セットを利用している。龍芯のホームページによれば、龍芯の最新 MIPS プロセッサ 3B は、クロック周波数 1GHz、8 コアで 128 ギガ FLOPS の演算性能を実現している。この 8 コア、128 ギガ FLOPS という数字は、偶然にも富士通が京コンピュータのために開発した SPARC64 VIIIfx プロセッサと全く同じである。ただし、曙光 6000 シリーズに龍芯 3B が用いられているかどうかは確認できなかった。

また、このセンターは「クラウド・コンピューティングセンター」でもあることを強調しており、星雲の能力を専門家や企業のみならず、様々なレベルで幅広い利用者にクラウドサービスとして、ネットワーク経由で提供することを指向している。具体的には、アプリケーションソフトウェアを提供する SaaS（Software as a Service）、ソフトウェアを構築および稼動させるための土台となるプラットフォームを提供する PaaS（Platform as a Service）、仮想マシンやネットワークなどのインフラを提供する IaaS（Infrastructure as a Service）などを、外部からサービスとして利用できる。さらに、自治体向けの計算機インフラとして、例えば深圳市の住民サービスに利用したり、市民に星雲のストレージのある領域を割り当てて、個人的な、画像・動画・音声などを保管するライフログのようなサービスを提供することも計画しているとのことである。とにかく演算能力にまだ余力が

あるので、これまでにない利用の方法を探っているらしい。

（6）日本側の専門家の分析

全般的に星雲は、天河 1A と同様のシステム構成であり、同様の目的を持つスパコンであると考えられる。ただし、センターとしての位置づけが異なるため、クラウドのような利用スタイルも検討していると考えられる。

星雲は、独自開発で最新の中国製 CPU（龍芯）を利用しているが、前述の天津にある天河と同じく米国製 GPU で性能を得ているシステムである。今後、中国全体の総合的なスパコン戦略として、これまで通りアクセラレータ（GPU）を主体とするのか、CPU 主体のシステムを主体としていくのかで、アプリケーションの開発方針が大きく異なる。すなわちどちらの戦略でいくかを明確にしないと、一般にハードウェアの寿命は 5 年間であるが、ソフトウェアの寿命は 20 年と言われている中、アプリケーション開発者やユーザが混乱し、アプリケーションの成果が出しにくい状態になると考えられる。

（7）将来性および課題

天津スパコンセンターと共通している課題は利用率の向上であり、特に高性能スパコンならではの計算力の活用であろう。このセンターは、深圳市が国家プロジェクトに 75%を出資して建設したと伝えられているが、かと言って高性能スパコンでなくとも、通常のサーバーを用いたシステムで実行できる、医療サービス改善などの自治体サービスや住民のライフログなどに星雲が使われるのは、本末転倒と思われる。これは、TOP500 ランキングで上位を取るという分かりやすい目標がスパコン開発の主目的であったために、その目的が果たされた先にある、実行効率の改善やスパコンの性能を活かし切る応用アプリケーションの開発など、地味ではあってもスパコン技術の本質的分野の研究開発が進んでいなかった故とも考えられる。したがって、既に着手はされているが、今後はさらなる人材と資源を投入して、科学計算やシミュレーション用のパッケージソフトウェアや共通的に利用できるライブラリなどの開発など、より利用しやすい環境の整備が先ず重要な課題と考える。

5. 今後の日中協力

天河 1A も星雲も、その計算能力をもっと有効活用したいと考えており、日本の応用アプリケーションの事例やノウハウの詰まったライブラリなどは、中国の研究者にとって貴重な情報であろう。また、もし日本の研究機関や研究者が有償でスパコンを使ってくれれば、政府にも実績としてアピールできる。ただ、その場合に日本側にどのようなメリットがあるかは不明である。したがって、協力の可能性は否定できないが、日本側のメリットがはっきりするかどうかが問題となろう。

なお、深圳スパコンセンターでは交換研究者やインターンを募集しており、要望があれば日本の学生や研究者も受け入れるとのことであった。ただしその場合は、中国の学生や研究者を日本の施設に受け入れることが交換条件とのことであった。

6. 所感

以下に、研究者、技術者らと面談した印象を述べる。ただし、これは筆者の個人的な意見であることを改めて確認しておきたい。

（1）研究開発投資のアンバランスさ

中国のスパコンの研究開発は、高いベンチマーク性能を誇るハードウェアを開発する段階までは力が入っているが、その先のスパコンの能力を引き出す部分の研究の計画や実施が不十分に見えた。そのため、安価あるいは無料に近い利用料にもかかわらず、天河 1A や星雲の稼働率は非常に低く、現時点では計算能力を持てあましている。別の言い方をすれば、ハードウェア優先で、ソフトウェアの研究開発やノウハウの獲得には十分な研究費と研究者が割かれていない印象であった。

（2）政府の方針に左右される研究開発

上記（1）の理由は、恐らく中央政府や地方政府の方針で、「スパコン利用者や研究者のニーズではなく、TOP500 ランキングで上位に入ること自体が目的化している」からであろう。このことは、政府の方針によって重要研究テーマがドラスティックに変化することを意味する。そのため研究者が政治の動向を強く意識していると感じたが、これではスパコン分野の研究者が本当に重要な研究課題に継続して取り組むことは難しいと考える。

また、天河 1A や星雲も、中央政府の方針と地方政府の資金とで完成したものの、上記のように稼働率は低く、今後仮に利用者が増えたとしても、利用料だけではとても巨額な設備の運営・保守の費用をまかなえない。両センターの責任者らは、地方政府からの資金がストップすることを非常に危惧しており、何とか有用性をアピールしたいと苦心しているようだった。

（3）研究成果のビジネス適用

一方で、研究成果をビジネスにつなげようとする姿勢は強い。

星雲は中科曙光信息公司の製品である曙光シリーズを用いて構成されている。同社は 2010 年に、商用スパコンや高性能サーバーの製造工場を天津で稼働させたが、曙光 5000 シリーズなどの中国国内でのセールスは非常に好調とのことであった。そういう意味で、現時点における中国スパコン研究の最大の勝利者は、中科曙光信息公司ではないかと思う。

地球シミュレータの NEC も京の富士通も、スパコンの国家プロジェクトを通じて得た成果を汎用品ビジネスに生かし、投資を十分に回収することが、残念ながらできていないようなので（日本と中国とでは経済や商用スパコンの普及率などの差があるにせよ）、曙光信息公司の姿勢には学ぶものがあると感じた。

7.「京」「天河 1A」「星雲」の比較

参考までに、日本の理化学研究所の「京」と中国の「天河 1A」及び「星雲」のデータを比較したものを下記に示す。

表 1－1 「京」「天河 1A」「星雲」の比較

項目	京	天河 1A	星雲
TOP500 順位 *	1	2	4
設置場所	理化学研究所 神戸	天津スパコンセンター	深圳スパコンセンター
ベンダ	富士通	国防科学技術大	曙光信息
完成年（ハードウェア）	2011	2010	2010
プロセッサ（CPU）	SPARC64 VIIIfx	Xenon X5670 14336	Xenon X5650 9280
アクセラレータ（GPU）	なし	NVIDIA Tesla C2050 7168	NVIDIA Tesla C2050 4640
LINPACK（Rmax）	10.51 ペタ FLOPS	2.57 ペタ FLOPS	1. 27 ペタ FLOPS
消費電力	12.66 MW	4.04 MW	2.58 MW
OS	Linux	Linux	Linux

*2011/11 時点の TOP500 の順位
出典：TOP 500 Supercomputing Sites　http://www.top500.org/

8. 参考文献等

野村稔『スーパーコンピューターをめぐるグローバル化の動き』Science & Technology Trends, p.23-p.35, 2011 年 9/10 月号
科学技術振興機構 研究開発戦略センター『電子情報通信分野　科学技術・研究開発の国際比較 2009 年版』, p.102-p.107
科学技術振興機構 研究開発戦略センター『電子情報通信分野　科学技術・研究開発の国際比較 2011 年版』, p.66-p.67
伊佐進一『「科学技術大国」中国の真実』講談社 2010 年
理化学研究所 計算科学研究機構 ホームページ
天津スパコンセンター ホームページ
深圳スパコンセンター ホームページ

第二章　有人潜水調査船「蛟竜」

科学技術振興機構　研究開発戦略センター
副センター長
植　田　秀　史

1．世界の有人潜水調査船

有人潜水調査船は、宇宙と並んで人類の未知の世界である深海を人間の眼で直接観察できる有力な手段であり、世界の主要国が開発を進めてきた。現在、4000m 以深の深海に潜航可能な有人潜水調査船を保有しているのは、日本、米国、フランス、ロシア、中国に限られる。

このうち日本は、「しんかい 6500」を保有し、1989 年に 6527m まで潜航し世界最深記録を達成、また、20 年以上に亘って運用し、1270 回を超える潜航実績を持っている。この日本の「しんかい 6500」を追い抜こうとして開発されているのが、中国の有人潜水調査船「蛟竜[2]」である。「蛟竜」の最大潜航深度は 7000m を目標としており、達成されれば世界最深となる。2011 年 7 月には 5057m の潜航に成功しており、2012 年に 7000m の潜航を目指す方針と言われている。したがって、「蛟竜」が 7000m の潜航に成功すれば、深度の観点からは中国、日本が世界の一位、二位を占めることになる。

表 2－1　世界の深海潜水調査船

名前	しんかい 6500	蛟竜	Alvin	Nautile	Mir1, 2
国籍	日本	中国	米国	フランス	ロシア
建造年	1989	2009（試験中）	1964	1984	1987
運用者	JAMSTEC	COMRA	WHOI	IFRMER	ロシア科学アカデミー
潜航深度（m）	6500	7000	4500	6000	6000
乗員（うち研究者）	3（1）	3（2）	3（2）	3	3（2）

出典：平成 21 年版「中国の科学技術力について（ビッグ・プロジェクト編）」
科学技術振興機構　中国総合研究センター

2．中国の海洋調査研究

中国は、海洋資源の持続的な利用等を重視し、海洋政策を積極的に進めている。政府の主管庁として国家海洋局が設置されており、2008 年 2 月には海洋政策の基本的な考え方を示した「国家海洋事業発展計画」が取りまとめられた。このなかで、海洋の調査観測も重視されており、以下のような調査観測手段の整備が進められている。

[2] 広辞苑によれば、「蛟竜」は「こうりょう」と読み、まだ竜とならない蛟（みずち）のことで、水中にひそみ雲雨に会して天に上る想像上の動物という。また、蛟（みずち）は蛇に似て角と四脚とを持ち、毒気を吐いて人を害する想像上の動物という。

（1）海洋科学調査船

大洋 1 号、実験 1 号、3 号、科学 1 号、3 号といった海洋科学調査船を保有しており、遠洋、近海を含めて調査が行われている。新たに海洋科学調査船（4000 トン級）建造プロジェクトが開始されており、また、中国初の極地科学観測砕氷船が 2013 年に完成の予定である。（現在は、外国から購入した「雪竜号」を使用。）

（2）海洋観測衛星

海洋 1 号 A、B の 2 機の海洋観測衛星が運用されており、海洋環境のモニタリングなどが行われている。

（3）海中探索機

海中探査機は、「AUV」（自立型海中ロボット）、「HOV」（有人潜水艇）、「ROV」（遠隔操作ロボット）に分類される。このうち、「HOV」（有人潜水艇）が、今回調査を行った「蛟竜」である。「AUV」（自立型海中ロボット）については、中国科学院瀋陽自動化研究所が「北極 ARV」（潜航深度 500m）を開発し、北極調査に利用している。また、6000m 級の CR－02 をロシアと共同で開発した。「ROV」（遠隔操作ロボット）については、3500m まで潜航可能な「海龍号」が運用されているほか、上海交通大学で、最大深度 4500m の ROV が開発中である。2011 年 4 月には、3500m の ROV を使用して、海底から硫化物と生物のサンプルを初めて採取したと報道されている。

（4）その他の海洋調査

これら以外にも中国は、IODP（統合国際深海掘削計画）に参加したり、南極に 3 つの基地を設置（4 番目の基地を建設予定）して観測を行うなど、国際的な活動も活発である。海洋調査観測については、多くの機関が関与し、国全体として進められている。「蛟竜」について調査する上でも、以上のような背景は理解しておくことが重要と思われる。

3.「蛟竜」視察

（1）訪問の概要

①訪問日時：2012 年 1 月 13 日（金） 午前 9 時 30 分ー午後 3 時
②訪問場所：中国江蘇省無錫市近郊 China Ship Scientific Research Center（CSSRC）
③日本側訪問者：

植田 秀史	科学技術振興機構	研究開発戦略センター 副センター長
単 谷	科学技術振興機構	中国総合研究センター フェロー
磯崎 芳男	海洋研究開発機構	海洋工学センター長
小椋 徹也	海洋研究開発機構	海洋工学センター 運航管理部

④中国側対応者：

Liu Feng Deputy Director,
Chief Expert of National Key Project 7000m HOV
China Ocean Mineral Resources R&D Association（COMRA）
Cui Weicheng Deputy Director, CSSRC

Xu Qinan　Research Professor, CSSRC

（注）1. COMRA の所在地は北京

2. Cui Weicheng、Xu Qinan 両氏は、中国の有人潜水調査船に関する代表的な研究者、技術者のようで、メディアにも登場している。

写真 2－1　CSSRC の玄関にて
左より Xu（中）、植田（日）、Liu（中）、磯崎（日）、小椋（日）、Cui（中）

©単　谷

（2）CSSRC について

CSSRC（China Ship Scientific Research Center）は、無錫近郊の風光明媚なリゾート地に位置する、中国船舶重工集団公司傘下の研究所である。CSSRC は「蛟竜」の開発者である。「蛟竜」は、現在メンテナンスのため CSSRC の倉庫にあり、そこで「蛟竜」を見学した。

中国船舶重工集団公司は造船業が中心であるが、最近は風力発電機なども製造しているとのことである。CSSRC の研究者数は約 1000 人、1951 年設立で、我々が訪問した際、60 周年記念の看板が立てられていた。

主な研究項目は、基礎研究、新型の船舶の開発、潜水艇の開発で、長さ 474m に及ぶ大型の試験水槽を保有しており、今回見学できた。資金は潤沢らしく、昨年 4 月に本館が新築されたとのことである。

写真２－２　CSSRC 本館正面

© 植田秀史

なお CSSRC は海に面してはおらず､｢蛟竜｣は陸路により運ばれてきたとのことである。日本の「しんかい 6500」は、母船からただちに海洋研究開発機構のメンテナンスエリアに移動できるため、これに慣れた海洋研究開発機構の専門家は、少し驚いていた。

（3）開発経緯

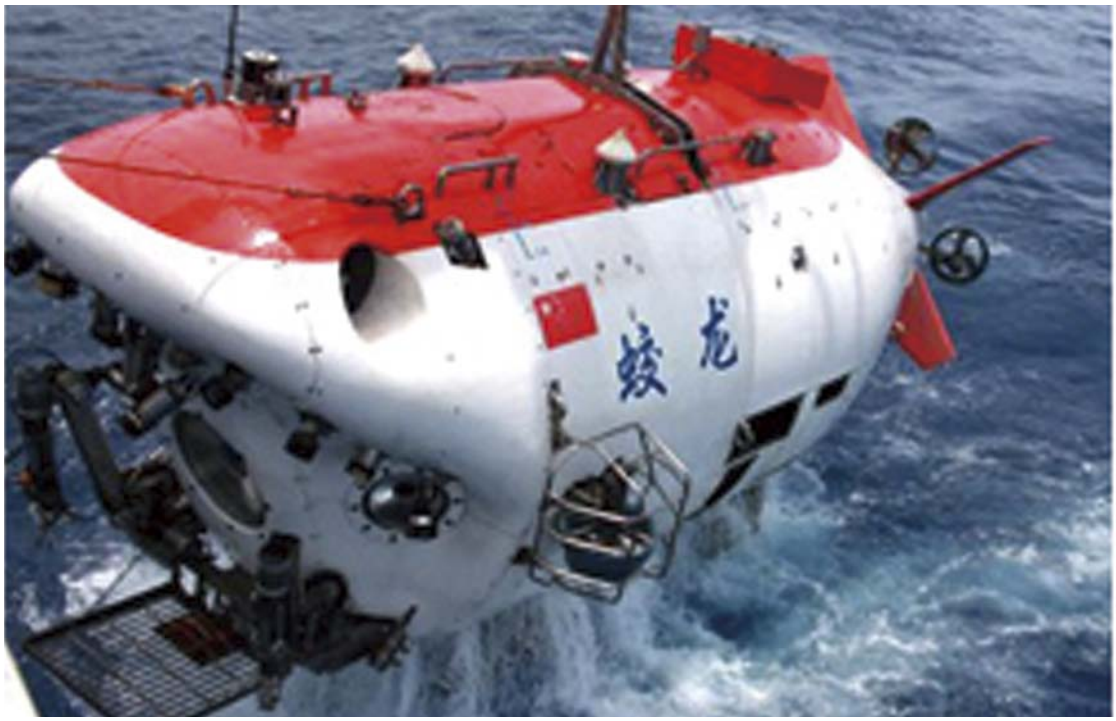
1992 年に有人潜水調査船の開発提案が、CSSRC などの研究者・技術者からなされ、政府部内での検討の後、2002 年に開発が開始された。この間十年が経過しており、提案を行った研究者・技術者たちにとっては、大変長い間待たされたことになる。この有人潜水調査船の開発は、「第 10 次 5 カ年科学技術発展計画（2001 ー 2005 年)」の「国家ハイテク研究開発発展計画（863 計画)」のプロジェクトとして進められた。有人潜水調査船の開発／運用主体は公募により決定され、COMRA が所有･運用し、CSSRC が設計、開発、試験を行うこととなった。

当時中国では、300m の有人潜水調査船の実績しかなく、CSSRC としては 6000m の開発を考えていた。しかし、政府部内で、既に日本が 6500m を達成していたので、それを上回る 7000m を目標とすることになったとのことである。CSSRC としては、6000m と 7000m では大差ないと考えていたが、実際開発してみると、7000m 仕様の部品の調達等に苦労したとのことである。ちなみに日本は、600m → 2000m → 6500m とステップを踏んで開発を行っており、この点、中国は大幅な技術的ジャンプを行っている。

これまでの経費は、全て国費で負担されている。開発経費は科学技術部が負担し、それ以降は国家海洋局が負担している。また運用が本格化すれば、利用者に負担してもらうことも検討する可能性があるとのことであった。予算計上を行う省が開発段階により異なる点は、我々から見ると奇異な感じもするが、政府全体として取り組んでいるとも解釈できる。政府は開発側の意見を良く聞き、柔軟に対応してくれていると評価していた。

なお「蛟竜」は、当初「和諧」と呼ばれていたが、途中で名称変更された。（名称変更の理由については、中国高速鉄道の車両が「和諧号」と命名されたため、同一名を避けたとの情報があるが、今回確認はしなかった。）

写真 2－3 「蛟竜」の外観



出典：中国国家海洋局ホームページ

（4）使用技術・部品

有人深海潜水船の最も重要なパーツである耐圧殻は、「しんかい 6500」は日本製であるが、「蛟竜」はロシア製である。この点から、中国が有人深海潜水船のキーとなる技術を保有していないとの解釈も可能である。またインターネットからの情報によれば、今回面会した Cui Weicheng 氏が、「蛟竜」のパーツの国産化率は 58.6%と話したとされている（http://memo-no-memo.cocolog-nifty.com）。

しかし、有人深海潜水船は定期的に建造されるものではなく、日本においても「しんかい 6500」以降、20 年以上建造されていない。また、「しんかい 6500」でも多くの輸入部品が使われている。従って、世界中からベストな部品を集めて有人深海潜水船を建造するというのも一つの方法であり、少なくともこれまで中国はその方法で成功しており、トータルとしての技術力は十分保有していると考えられる。

（5）現状及び今後の計画

2009 年 8 月に海上試験出港式が行われ、現在も試験中である。2010 年 8 月には 3759m、2011 年 7 月には 5057m の潜航に成功しており、2012 年に 7000m の潜航を目指す方針と言われている。（なお、本報告書の校正段階で入ってきたニュースでは、「蛟竜号」が 6 月 24 日、太平洋のマリアナ海溝で、水深 7020 メートルの潜水に成功し、「しんかい 6500」の持つ記録を抜いたとのこと。）

中国の「科学日報」が主催した、2011 年中国国内 10 大科学技術ニュースに、「『蛟竜号』、初めて 5000m の潜水深度を突破」が選ばれており、中国国内では注目されている。なお、このニュースの一年前となる 2010 年の 10 大ニュースにも、「中国は世界で 5 番目の 3500m を超える有人潜水技術保有国となった」が選ばれている。

試験中ではあるものの、並行して調査運航も行われているとのことである。具体的には、中国や日本も参加している国際機関である国際海底機構（ISA: International Seabed Authority）からの契約に基づく調査も実施している。（並行して調査運航を行うことの理由として、資金回収の側面もあるとの説明があったので、有料の契約と思われる。）なお国際海底機構は、国連海洋法条約により人類の共同の財産であると規定された深海底（いずれの国の管轄権も及ばない区域–各国の大陸棚の外側–の海底及びその下）の資源の管理を主たる目的として、1994 年に設立された国際機関であり、事務局はジャマイカの首都キングストンに置かれている。

本格的な運用時には、公募で調査の提案を募り、専門委員会で審査して運航計画を決める予定とのこと。運用に当たっては、海外にもオープンにしたいとのことであり、海外の研究者が安心して搭乗できるよう、船舶として認証されるため船籍を取得する予定である（国際的な安全基準を満たしていることを証明する効果あり）。我々が訪問した際、船籍取得の関係者も「蛟竜」を見学していた。

写真 2－4 「蛟竜」の保管場所の外観

© 植田秀史

（6）試験運航のスケジュール

「蛟竜」は、2009 年 8 月に海上試験出港式が行われた後、2 年以上が経過するが、まだ 7000m の潜航は実現されていない。一方、日本の「しんかい 6500」は、1989 年 1 月 19 日の進水式の後、約 7 カ月後の同年 8 月 11 日には潜航深度 6572m を記録している。このため、「蛟竜」に何か問題があって 7000m の潜航が難しいのではないかとの推測もあ

りうる。この点について、今回の調査では「蛟竜」に何か問題があるという話は一切無く、上記のとおり今年中に 7000m の潜航にトライする計画であると、中国側の面会者は述べていた。

中国の試験運航のスケジュールがゆっくりしている理由の一つは、建造・運用の形態にあると思われる。すなわち「しんかい 6500」の場合、海洋研究開発機構とメーカー（三菱重工）が共同で開発したが、保有・運用者である海洋研究開発機構は引き渡しを受けないと運用ができないことになっていた。このため建造したメーカーは、所要の試験をできるだけ早く終了させ、運用者に引き渡したものである。これに対し中国の場合、運用担当の COMRA は開発当初から「蛟竜」の所有者である。従って「蛟竜」は、試験運航と実運用を並行して実施することが可能であると考えられる。

前述の国際海底機構からの契約に基づく調査のように、国としてのニーズの高い実運用があればそれをスケジュールに入れ、並行して深海への潜航試験を実施しているのではないかと推察される。この点から見ると 7000m への潜航は、世界記録達成という意味はあるものの、実際のニーズは小さいとも感じられる。これまでの実績を見ると、2010 年 8 月に 3759m、2011 年 7 月に 5057m と、ステップバイステップで深度を深めており、2012 年の結果が待たれる。

4.「蛟竜」と「しんかい 6500」の比較

全般的には、「蛟竜」と「しんかい 6500」は似ているが、20 年以上の開発時期の差があり、「蛟竜」は、その間の電子技術の進歩等を活用し「しんかい 6500」より、性能が優れている点が散見される。以下、それらの点について説明する。なお、「蛟竜」と「しんかい 6500」の詳細な比較は、下記（6）参考データに示す。

（1）重量

「蛟竜」は 22 ー 23 トンで、「しんかい 6500」（26.7 トン）より軽い。軽量化の理由は、船体の長さを短くしたこと、部品の軽量化を進めたことによるとのこと。

（2）乗員

「蛟竜」は乗員 3 名のうち研究者が 2 名、パイロット 1 名。「しんかい 6500」は逆で、研究者が 1 名、パイロット 2 名。同行した海洋研究開発機構の専門家は、パイロットの負担が大きくならないかを気にしていた。この点について中国側の説明は、米国のアルビンの例を参考に研究者を 2 名とし、さらに自動操縦を採用してパイロットの負担を軽減したとのことであり、同乗する研究者にも一部の操作を手伝ってもらうとのことであった。

（3）のぞき窓

ともに 3 個だが、「蛟竜」は中央が大きく（200mm）また、視野がサイドの窓と重なっている。「しんかい 6500」は 3 個とも 120mm で視野の重なりがない。「蛟竜」の場合、両サイドの窓から研究者が観察し、パイロットに希望する針路を伝えやすいと思われる。

（4）最大深度での作業時間

「蛟竜」は 6 時間、「しんかい 6500」は 3 時間。「蛟竜」の場合、全体のオペレーション（着水から揚収まで）に 12 時間と想定している（「しんかい 6500」は 8 時間）。海洋研究開発機構からの専門家は、パイロットが一人のため負担が大きいことや電池の充電時間等を考えると、最大能力で連日運航するのは大変ではないかとの印象を持っていた。今後、計画どおりの運航が可能か、推移を見る必要がある。

（5）電池

電池については、「しんかい 6500」は銀亜鉛電池からメンテナンスに優れたリウムイオン電池に変更しており、「蛟竜」もその方向で検討中であるとのことであった。

（6）参考データ

上記の内容を含め一覧表としたものを、参考として添付する。

①船体

項目	しんかい 6500	蛟竜	備考
全長	9.5m	8.2m	
幅	2.7m	3m	
高さ	3.2m	3.4m	
空中重量	26.7 トン	22 ー 23 トン	蛟竜が軽い
耐圧殻内径	2m	2.1m	蛟竜はロシア製
覗窓	3 個	3 個	蛟竜は視野が重なっている
覗窓内径	120mm	200mm 120mm × 2 個	蛟竜は中央が大きい
乗員（観察者）	3 名（1 名）	3 名（2 名）	この点、蛟竜は優れている
主蓄電池	リチウムイオン （400Ah/ 群 2 群並列）	銀亜鉛 （800Ah）	銀亜鉛電池は高価で手間がかる
ペイロード	150kg	220kg	
浮力材	シンタクティック フォーム	シンタクティック フォーム	

②潜水船としての機能

項目	しんかい 6500	蛟竜	備考
潜行深度	6500m	7000m	
海中作業時間	8 時間	12 時間	この点、蛟竜は優れている
降下速度	44m ／分	50m ／分	

最大深度での作業時間	3 時間	6 時間	
最大速力	2.5 ノット	2.5 ノット （3 ノットまで可）	
運用状況	1989 年以降 1200 回以上潜航	試運転中 2011 年、5057m	

③観測機能

項目	しんかい 6500	蛟竜	備考
母船との通信	水中通話機 画像伝送装置（上り 16kbps、10 秒ごとコマ送り画像）	「しんかい 6500」と同等。10 秒でコマ送り。	
マニュピレータ	2 基 （100kg）	2 基	

出典：海洋研究開発機構及び CSSRC のホームページなどより作成

5. 今後の課題

まず、今年予定されている 7000m の潜航試験を成功させることが、中国にとって最大の課題である。これについてはニュースを待つしかない。その次の課題は運用技術の確立であろう。今回の訪問において中国側から、運用開始後の試験・検査や部品の取替え頻度等について質問があった。「しんかい 6500」の 20 年以上にわたる運用実績は、中国側にとって大変参考になるものと思われる。

6. 今後の日中協力

日中協力の可能性は大いにあると言える。中国側にとっては、「しんかい 6500」の運用実績は貴重なものであり、日本からの情報入手を期待している。今回の訪問時においても、具体的にリチウムイオン電池についての情報提供を求められており、今後、COMRA/CSSRC –海洋研究開発機構間の運用技術面での協力は十分可能性がある。

また、有人深海潜水調査船は世界に数隻しかなく、中国も世界の研究者に利用してもらいたいと考えていることから、世界の科学者コミュニティを対象に、日中が協力して運航計画を検討するといった運用協力も考えられる。

7. 所感

今回の訪問に対して中国側は、大変協力的であった。COMRA の Liu Feng 氏は、多忙な中、北京から無錫まで来て我々に対応してくれた。質問にも丁寧に答えてくれたほか、先方からも特に「しんかい 6500」の運用について多くの質問がなされ、「しんかい 6500」の運用技術に対する評価は高いと感じられた。また、世界の中で有人潜水調査船を保有し

ている数少ない国同士の親近感が感じられた。ただ残念ながら、「蛟竜」の写真撮影は禁止であった。これについては、他の分野のプロジェクトも共通した方針であるかどうか、確認する必要がある。CSSRC の構内の写真撮影は OK であった。

前述のとおり、中国は重要技術である耐圧殻の製造技術は持たない。また、部品も輸入品が多い。しかし、国産技術で有人潜水調査船を製造すること自体に目的があるわけではない。有人潜水調査船は、あくまで調査の一手段である。中国においては、海洋調査を国の重要事項と位置づけ、国の体制も整備され、多くの機関が参加して海洋調査を実施している。海洋調査船、海洋観測衛星、無人海中探査機等と合わせて有人潜水調査船を整備し、調査を長期的、計画的に進め、その成果を有効活用していく方針である。このように、国の意図が明確で長期的に安定していることは、研究開発プロジェクトを進めるうえでは極めて重要である。この点から中国は、長期的にプロジェクトを進めていく力は十分にあると感じられた。

今回面会した方々は、いずれも科学者、技術者であり、政府のいわゆる役人はいなかった。そのためか、政府の立場といったものが会話にでることは全くなく、純粋に現場の技術者同士の会話という感じで、フランクな話し合いが行われた。海洋研究開発機構からの同行者にとっては、そのような感じが強かったのではないかと推察される。中国側が、自分たちの活動を特に過大評価したり、逆に過小評価しているとは感じられなかった。また、日本に対して特にライバル意識があるようには感じられなかった。政府のいわゆる役人が同席した場合、同じような展開になったかは不明である。

なお中国側は、日本に将来計画があるのか気にしていた。（日本には、公式な計画はないが、「しんかい 10000m」と言った構想が語られる場合があり、そのような情報が中国にも流れている模様である。）

8. 参考文献等

科学技術振興機構中国総合研究センター「中国の科学技術の現状と動向」2010 年
科学技術振興機構中国総合研究センター「中国の科学技術力について　ビッグ・プロジェクト編」2009 年
海洋研究開発機構のホームページ（「しんかい 6500」の情報等）
China Ship Scientific Research Center のホームページ

第三章　核融合研究施設「EAST」

日本原子力研究開発機構
核物質管理科学技術推進部　技術主席
寺　岡　伸　章

1．世界の核融合研究

（1）核融合とは

核融合とは、重水素とトリチウム（3 重水素）を 1 億度まで加熱してプラズマ状態とし、融合させる反応である。核融合発電は、核融合反応で得られるエネルギーを、水、ヘリウムなどの冷却材で取り出し、タービンを回転させて電気を得ることである。1 グラムの核融合反応によって得られるエネルギーは、石油 8 トン分のエネルギーに相当する巨大なものとなる。核融合反応は、高温のプラズマ状態が維持されてはじめて起こるが、その安定性が失われると直ちにプラズマが冷却し反応がストップするため、核暴走には至らず核融合の安全度は高い。さらに、高レベル放射性廃棄物を生成せず、核兵器への転用が不可能などメリットは多いといわれている。

（2）国際的な動向

核融合研究にはトカマク型、ヘリカル型、ミラー型、レーザー型などのタイプが世界中で試みられてきたが、現在ではトカマク型がもっとも核融合の実現に近いといわれている。トカマクは1950年代に旧ソ連で発案されたもので、ロシア語で、トーラス（ドーナツ形状）、容器、磁気、コイルの頭文字を組み合わせた造語である。

1980 年代、日欧米の三大トカマク実験装置である JT-60（日本原子力研究開発機構）、JET（EU、英国カラム研究所）、TFTR（米国プリンストン大学プラズマ物理研究所）を使った実験によってプラズマ挙動の基礎研究が大きく進展し、JET は 1991 年、JT-60 は 1996 年にそれぞれ臨界プラズマ条件（核融合反応を起こした場合に入力エネルギーと出力エネルギーとが等価になる条件）をクリアした。また、JT-60 は同年プラズマ温度 5.2 億度の世界記録を達成している。

（3）国際熱核融合実験炉（ITER）計画

日欧米の研究により、核融合反応が持続する自己点火条件（いわゆる核融合炉条件）の実現の見通しができるようになったため、自己点火条件の達成を目指して国際熱核融合実験炉（ITER）計画が日欧米露中韓印の 7 極により合意され、現在フランスで建設が進められており、運転開始は 2020 年、核融合反応の実現は 2027 年の予定である。

参加極は、実験炉建設にかかる経費を節約できるというメリット以外に、世界のプラズマ研究の最先端のデータを得ることができるという大きな利点がある。ITER 計画によってプラズマ制御のパラメータが確実に得られ、研究成果は参加極の共通の知見となるため、ITER 計画によって参加極の核融合研究水準はある程度平準化されることになると考えられる。

2. 中国の核融合研究

中国の核融合研究は、1950 年代に四川省の研究所で始まったが、文化大革命（1966 ー 76 年）で研究が停滞・中断した。改革・開放政策以降、核融合は将来の有力なエネルギー源と考えられるため、精力的に実験装置を整備し研究を進めることで急速に実力をつけてきている。しかし、中国は先進国と比較して実験装置の開発・整備の着手が遅れたため、プラズマ加熱技術、プラズマ計測診断技術などの基盤的な要素技術で、10 ー 20 年遅れているともいわれる。

中国のトカマク型核融合研究は、合肥にある中国科学院プラズマ物理研究所が、1994 年 5 月にロシアの支援によって HT-7 を開発したことで本格化していく。1998 年 7 月、国家計画委員会（現在の国家発展改革委員会）は、HT-7 の後継装置である HT-7U プロジェクトの建議書を正式に承認し、プラズマ物理研究所が建設を進め、2003 年 7 月、HT-7U は各種性能テストに合格した。

2003 年 10 月に HT-7U の名称が EAST に変更された。EAST は実験「Experimental」、先進「Advanced」、超伝導「Superconducting」、トカマク「Tokamak」の頭文字を組み合わせたものである。直訳すると「先進実験超伝導トカマク」であるが、かつ EAST は「東方」の意味を合わせ持つ。東方（洋）を代表する核融合装置という中国人の誇りが感じられる名称である。

2004 年 9 月末、EAST は計画どおり、16 個のトロイダル磁場コイル、14 個のポロイダル磁場コイル（中心ソレノイドコイル 6 個、平衡磁場コイル 8 個）、2 個の常伝導コイルを完成させた。製造されたコイルのサイズの誤差は 1.5 ミリ以内で、世界レベルに達したとされる。

3. EAST 視察

EAST があるプラズマ物理研究所の訪問時期は春節（旧正月）休暇前で、仕事の後片づけで忙しい状況であったにもかかわらず受け入れてもらい、事前に渡しておいたヒアリング項目に沿って誠実に回答してもらった。遠来の客を大切にするという中国文化と、日本との関係を重視している態度の現れであり、感謝したい。

写真３－１　李所長と寺岡との記念撮影
（中国科学院プラズマ物理研究所の会議室にて）

© 秦　舟

（1）訪問の概要

①訪問日時：2012 年 1 月 10 日
②訪問場所：安徽省合肥市　中国科学院プラズマ物理研究所
③日本側訪問者：
　　寺岡伸章　日本原子力研究開発機構核物質管理科学技術推進部技術主席
　　秦　舟　　科学技術振興機構中国総合研究センター フェロー
④中国側対応者：
　　李建鋼　中国科学院プラズマ物理研究所　所長
　　趙君煜　中国科学院プラズマ物理研究所　計画財務処長他

（2）中国科学院プラズマ物理研究所

中国におけるトカマク型の核融合研究は、主に安徽省都の合肥の科学院プラズマ物理研究所で開発された EAST を用いて行われている。合肥の郊外に湖に浮かぶ美しい島があるが、それは科学島と呼ばれていて、知能機械研究所など 5 つの研究所で構成される科学院合肥研究院がある。その中の研究所の一つが EAST を擁するプラズマ物理研究所である。

写真 3－2　合肥の科学島にあるモニュメント

© 寺岡伸章

（3）EAST の製造

プラズマ物理研究所によると、EAST の製造部品の 9 割は研究所の自主開発技術であり、残り 1 割のうち、装置の設計はプリンストン大学と米 GA 社の協力を得、超伝導材はロシアから導入してケーブルにしたという。EAST は、世界初の超伝導トカマク装置であるが、今でもプラズマ条件の大幅な変更実験にはプリンストン大学の支援・指示が必要といわれている。プリンストン大学からみると、海外の実験装置を使って研究データを得て、論文を書けるのは魅力的である。見方を変えると、中国はプラズマ制御技術を完全にマスターしているかどうかについて、懸念が残る。

EAST を構成する機器や資材の開発は、中国民間企業の技術力が満足すべき標準に達していないことや予算上の制約から、研究者自ら実施してきた経緯がある。実際に今でもプラズマ物理研究所内には、超伝導導体の製造などの工場があり、研究者と技術者が協力しながら作業を進めている。

それに比べて、日本では先端的な技術開発は研究所や大学が行うが、それをメーカーに発注して部品などを製造させる手法を取り入れてきた。政府がハイテクビッグプロジェクトを牽引することで、民間企業の技術力の向上に貢献してきたといえる。日本のやり方は研究者の負担が少なく、効率的であると中国人研究者も認めているので、次第に先端技術は研究者が開発し、製造は民間企業が行うという日本式に移行していくと思われる。

写真 3－3　EAST 炉心の実物大の断面模型
写真右が寺岡、左が秦

© 寺岡伸章

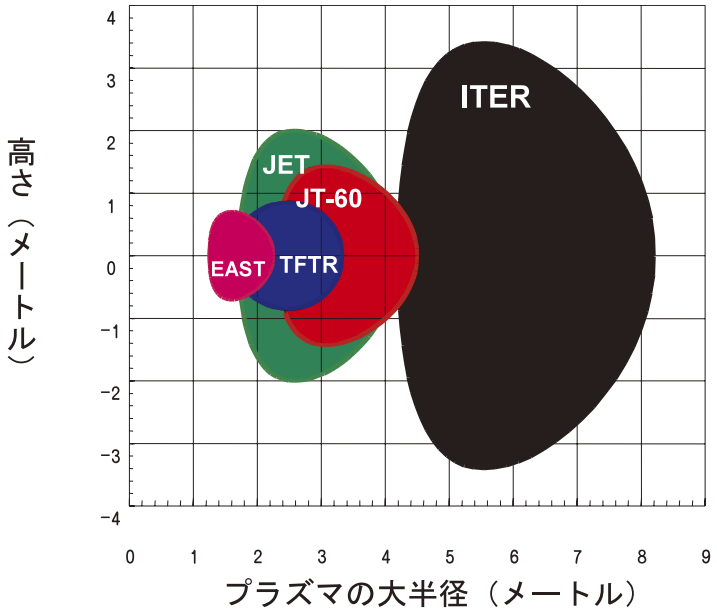
（4）EAST の仕様

EAST の目的は、プラズマ安定運転モードに関する科学及びエンジニアリングの研究である。HT-7 の次世代装置として、EAST は規模を拡大した上で、独特な非円形切断面、超伝導、冷却内部構造の 3 大特性を兼ね備え、プラズマの安定な実験運転に有利であるとされる。EAST の特徴は、廉価なコストで建造され、安全・安定運転が実現できていることである。

EAST のメインユニットは高さ 11 メートル、直径 8 メートル、重量 400 トンであり、真空容器、トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイル、内外サーマルシールド、クライオスタット、サポート系統等の 6 大部品から構成されている。

核融合の実現には、プラズマの超高温（1 億度以上）、高密度、長閉込め時間の三要素が重要である。EAST は 2011 年、プラズマの持続時間 100 秒、プラズマ温度 4,000 万度を達成し、次の目標は持続時間 400 ー 1,000 秒、高効率加熱を受けた場合のプラズマ温度は 1 億度に設定しているが、前述の世界三大トカマク実験装置と違って、装置の規模から臨界プラズマ条件を達成するのは困難である。

図３－１　代表的なトカマク装置のプラズマ断面



出典：日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門提供

4. EAST の評価と今後の核融合計画

（1）世界初の超伝導技術を用いたトカマク装置

EAST は、世界で初めて超伝導技術を用いたトカマク装置である。2009 年、核融合実験装置のコイルを超伝導化し、中国は世界に技術力を見せつけた。中国は核融合研究の後発組であるがゆえに、最先端の超伝導技術を導入することができたともいえ、僥倖というべきものであろう。その後、韓国がほぼ同様の規模の K－STAR を建設している。

EAST で超伝導による装置を実現した意義は大きく、ITER の設計にも活かされることになっている。また将来的な核融合の実用化においては、超伝導技術の使用が不可欠と考えられることから、超伝導に関連する各種技術で世界に一歩先んじたことは、大いに評価できよう。

（2）EAST の炉心容量

プラズマ研究にもっとも大きな影響を及ぼすのは、実験装置の炉心容量である。炉心容量で比較すると、おおよそ EAST は 10m^3、三大トカマク実験装置の一つである JT-60 は 60m^3、現在建設中の国際プロジェクトの ITER は約 1000m^3 と、それぞれ 1 桁の違いがある。

原子核の動きを超高速度にして、相互のクーロン力による反発を超えて原子核を衝突させ、核融合反応を起こさなければならない。コップのお湯より風呂のお湯の方が冷めにくいように、容量が大きいほど温度が高く、優れたプラズマ状態（高温、高密度、長保持時間）を実現でき、研究の大きな進展をもたらす。容量を大きくするためには真空容器を大きくするだけではなく、磁場を作るコイル、プラズマを超高温にするビーム加熱、高周波加熱、プラズマ計測システムなど各種基盤技術の開発が必要である。日欧米は、世界三大トカマク実験装置の開発に果敢に挑戦してきたため、これを支える基盤技術も並行して進

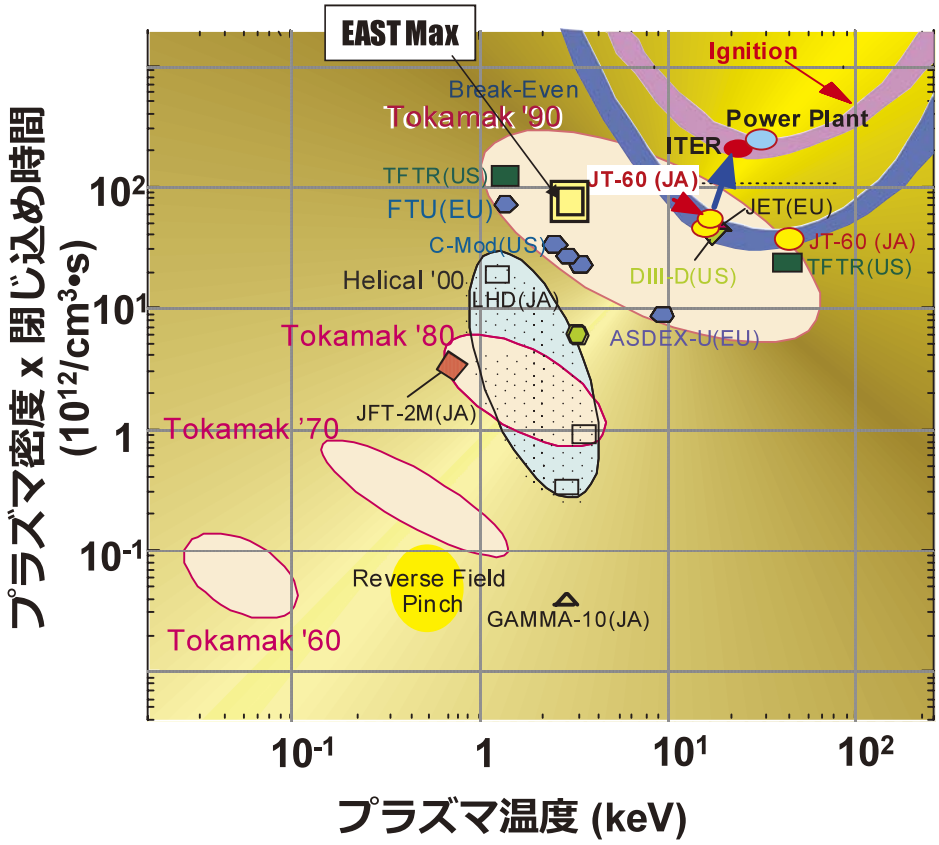
展してきたといえる。

図 3－2 に示すように、日米欧のトカマク型核融合研究では、プラズマ温度、密度、閉じ込め時間等実験装置の性能が 1960 年代から 10 年毎に 1 桁ずつ高くなっている。中国の EAST は最高の性能を発揮しても、日米欧の 1990 年代の性能を実現するのが限界である。中国は大型プラズマ実験装置開発の経験不足が、プラズマ研究の遅れに影響する可能性があると考えられる。

しかし、今回の調査でこの件を質したのに対し、中国側の回答は、「EAST の炉心容量の規模が小さいのは技術力の問題ではなく、超伝導技術を用いたプラズマの安定な運転が目標だからであり、さらに実用化を考えると小さいサイズの方が経済的である」と強く主張していたことは、少し驚きであった。

なお、昼食時に東電福島第一原子力発電所事故にも話題が及んだが、李建鋼所長は放射性物質の汚染への恐怖から中国人消費者が塩を買い占めたことを披露するとともに、日本政府が原子力発電所の再稼働に積極的に対処していない状況に対して批判的なコメントを表明していた。東電福島原子力事故が、中国の核融合研究に影響が及ぶかもしれないという危機感と苛立ちが現れていたように思う。

図 3－2　EAST の最大性能



出典：日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門提供

（3）核融合の将来計画

中国の核融合研究開発計画は、中国科学技術部の核融合委員会で作成・決定され、国務院と予算権限を持つ発展改革委員会が承認するという手順で進められている。中国における核融合の将来計画について、科学技術部が 2011 年 6 月に、核融合発電までの炉工学開発戦略を検討する「核融合統合設計準備グループ」を設立したとのことである。この構成員は中国人の専門家であるが、日米欧の専門家を招聘して一緒に技術面の検討を行い、2 年間で複数の案を取りまとめる予定である。この報告を受け、予算も含めた核融合発電計画を政府として決定し､続いて実現に向けて設計グループが設立されることになるという。

中国の国内外の核融合研究の取りまとめを行っている、科学技術部 ITER 計画執行センターの幹部は、個人的な意見と断りながらも、中国の核融合原型炉は 2030 年代に設計をはじめ､建設は2040年代になるのではないかと語っていた｡現実的な見通しかもしれない。今後とも、中国政府の核融合政策、研究進捗状況などを、さまざまなチャンネルを通して調査し注視していくことが必要である。

（4）ハイブリッド発電の可能性

今回訪問したプラズマ物理研究所の李建鋼所長が、2011 年 9 月に米国で開催された国際ワークショップで発表した資料によると、研究者レベルでは純粋な核融合発電及び核融合・核分裂ハイブリッド型の両者を選択肢と考えている。

核融合・核分裂ハイブリッド型炉というのは、核融合反応で得られる高速中性子を利用し、同じ炉内でウランやプルトニウムを核分裂させる炉のことである。ハイブリッド型炉は、核融合反応のエネルギー増倍率が 1 程度でも既存の材料で十分対応することができるため、早期の実用化が期待されるものだ。

李建鋼所長は、ITER 計画に参加してプラズマ研究の知見を得つつ、核融合・核分裂ハイブリッド型の早期実用化を目指す選択肢も考慮していることを述べたもので、ハイブリッド型の場合には 2035 年に原型炉の建設が完了するとの予定を立てている。一方、核融合の本命である純粋な核融合炉の実現は、エネルギー増倍率を上げるなど炉工学の開発が簡単でないため、この選択肢の場合には原型炉は 2045 年頃の建設完了となる見込みだという。

李建鋼所長本人が認めるように、中国政府としては、純粋な核融合炉及びハイブリッド炉の両者の選択を見据えつつ研究開発を進めている段階であり、国として炉の開発計画を決定しているわけではない。ハイブリッド炉は中間型で実現は早いかもしれないが、機器が複雑な構造となりリスクも高まるので実現可能かどうか判断するのは簡単ではない。ただし、国内のエネルギー危機が深刻化すれば、早期の実現が期待されるハイブリッド炉の建設に踏み切る可能性もあるとみられる。

5. 中国の核融合研究の課題

（1）研究水準の向上

中国の核融合研究は、前述のように遅れてスタートしたこともあり、キャッチアップに専念してきた経緯がある。これがある程度功を奏し、EAST の完成にみられるように世界的にみてもかなりのレベルに達しつつあると考えられる。しかし課題はこれからである。

世界の先頭を走る者は、必死の試行錯誤により研究開発に取り組むこともあって、自ら未知の分野を開拓する手法を取得していると考えられるが、追いつこうとする者はややもすると他国の技術の模倣や単純な導入に走ってしまう恐れがある。この点は、中国にとっての留意事項と考えられる。また研究論文の質では、各種国際会議などでの論文発表で見る限り、中国は現時点で主要先進国に追いつきそうなレベルにあるとは言い難い。このレベルアップも課題である。

しかし、ITER 計画に参加することにより、中国は世界最高水準のプラズマ関連のデータを入手することができ、かつ実験経験も蓄積しうるため、ITER 計画が本格的に動き出す 2020 年代後半には、実験炉を構成する炉工学の基盤技術は別としても、中国のプラズマ研究は世界レベルに達する可能性が高いと思われる。

（2）炉工学技術の向上

炉工学のもっとも重要な研究開発要素は、核融合で生成されるエネルギーの 80%を占める高速中性子からの熱回収、リチウムからのトリチウムの増殖、中性子から超伝導コイルなどの保護を行うブランケットの開発である。

中国はヘリウム冷却固体増殖方式（現状の設計では増殖比 0.95 と低い）とヘリウム冷却液体リチウム鉛増殖方式に取り組んでいるが、現状では公表された論文をもとに先行する欧州や日本などの開発研究へのキャッチアップを進めているところである。

日本は、原型炉を睨んで国際核融合材料照射施設 IFMIF に関する工学実証及び工学設計を、欧州と協力して着実に進めているのに対し、中国は現時点でそのような計画を持っておらず、今後どのように研究開発にアプローチするか注視される。

（3）中国式研究開発の特徴と課題

EAST は 2006 年 9 月に初放電に成功して以来、5,000 ショットの実験放電を実施している。0.5MA のダイバータプラズマを生成し、最長放電時間は 100 秒程度である。建設費は 3 億元で、他国の同規模の装置と比べて 1/15 ー 1/20 程度の格安で済ませている。実験段階から実働段階のコストを意識するのは、経済性に敏感な中国の特徴であると思われるが、技術開発のみに邁進しがちな日本は学ぶべきことと思われる。

中国は政府の上に立つ共産党の権限が強く、役所の縦割りが厳しくないため、学生教育、研究人材養成、産業育成など長期的視点に立った総合的な戦略が立案・実施しやすいというメリットを持つ。このシステムは多くの分野の行政組織に跨る核融合開発に有利に働くはずである。

EAST の装置の約 9 割は、研究所内のワークショップでの自作であると言われるので、ものづくりのレベルはそれなりに高いと推察されるが、逆に言うと装置製造開発のレベルが､所内ワークショップレベルの装置や機器にとどまってしまう可能性があるともいえる。民間企業の製造能力を生かしている、日本の方式に学ぶことも必要ではなかろうか。

（4）ハイブリッド発電

中国はまだ国家としての正式な決定は行っていないが、前述のように高度経済成長を支えるために早期にエネルギーを得たいという強い動機から、ハイブリッド炉を開発する可能性が指摘されている。核融合反応のみによる発電方式は、安全性が高く、高レベル放射

性廃棄物を生成せず、核兵器に利用されないといったメリットを持つといわれているが、ハイブリッド発電の場合には核分裂反応も併せ利用するため、このメリットを放棄することにつながるので、慎重な判断が必要となろう。

いずれにしても、中国が本気でハイブリッド炉の開発に踏み込むのであれば、中国が核融合の実用化で先んじる可能性があり、日本のみならず海外も中国の核融合の政策や研究開発の動向を注視する必要がある。

（5）人材育成

中国は先進国へのキャッチアップを目指して急いで核融合研究を行ってきたため、時間と手間をかけてきた先進国の日欧米と比べて、深いところまで達していない恐れがある。中国国内では、若手を一人前の研究者に教育できる段階に達しておらず、海外の大学や研究所に派遣して核融合の関連技術を習得させている段階にある。また核融合分野に限らないが、先進国にあるような学会が中国国内で十分に活動していないため、大学院生や若手研究者が研究成果を発表し､議論を戦わせる場が乏しいのは人材育成上大きな損失である。

しかし、今回訪問した中国科学院プラズマ物理研究所は、多くの大学院生を抱え、ITER 計画のような最先端プロジェクトでの課題を研究テーマとして切り出し、学位論文の研究テーマにしている。このような方法で、大学院生が大型プロジェクトに参加し、研究者として成長していくのであれば、狭義の学術研究に閉じ込められた日本の学生よりも恵まれているようにも思われる。

中国科学技術部は、教育部、核工業総公司などと協力して、核融合分野の人材育成策を取りまとめている。2020 年までの 10 年間で、ハイレベルの核融合研究人材 2,000 人を育成すること、北京大学、清華大学、上海交通大学、復旦大学、科学技術大学の一流 5 大学に核融合専門の学科を設立すること、核融合専攻の博士課程学生 200 人を支援していくこと、さらに民間企業に積極的に ITER 関連業務に参加させること、若者への普及活動として核融合夏季キャンプを開催することなどを提言している。

中国の核融合研究の歴史が主要先進国と比較して短いことは、中国の研究水準や技術レベルのハンディの大きな原因となっている。しかし、中国の核融合戦略と豊富な人材と潤沢な研究費の投下は、決して低く評価されるべきものではない。現在中国で核融合研究を担っている人材には、世界トップレベルは少ないかもしれないが、欧米で活躍している中国人が多数帰国するようになれば、飛躍的な研究の進捗が実現できよう。

ただ、欧米の研究機関などにおいて世界レベルの中国人研究者が活躍しているが、中国国内における研究環境や子女の教育問題などのために、中国政府による帰国奨励策がうまく機能していないとも聞く。しかしこれを補うものとして、共同研究や短期間の研究指導などにより、海外の中国人研究者の知見や技術を吸収する努力が行われているのは注目すべきである。

一方日本においては、政府の原子力分野への将来の研究費投入が必ずしも確定的でないことや、東電福島第一原子力発電所事故を受けて優秀な若手人材の確保が不透明になるなどの状況にあり、楽観的に評価することは許されないと思われる。

（6）自由な発想と自由な議論

今回の調査では、日中両国合わせて 4 機関で約 15 人の方々からヒアリングを行ったが、

その中で気になったのは、日中両国の政策担当者や研究者の発想の違いである。その違いは歴史的、文化的背景にも依存しているが、政治体制の影響も無視できないと思われる。中国は共産党の一党独裁国家であり、政治経済を含めて共産党の指導が大前提となっているため、自由な発想と自由な議論が十分に保障されているとは言い難い。

科学の発展には自由な発想と自由な議論が不可欠であると考えられるが、中国人の学生や研究者が、自由な発想の下で教育され、自由に議論を行う環境が整備されているのかどうか、懸念されるところである。自由な発想と自由な議論が無い環境では、既存の技術や知的権威に果敢に挑戦することで実現するイノベーション（創新）を期待することは難しいと考えられる。ただし、若者の意見や奇抜な発想を軽視しがちな日本社会も、自由な発想と自由な議論という点で改めるべきことも多いと考えられる。

6. 今後の日中協力

（1）研究者の交流

2007 年 12 月当時の福田総理訪中の折、「科学技術の分野における協力に関する日本政府と中華人民共和国政府との間の協力」（1980 年 5 月 28 日締結）の下で「磁気核融合関連研究開発分野における協力に関する実施取決め」が締結された。その実施取決めを受けて、日中両国間の政府レベルの合同委員会が毎年開催されており、共同研究の実施、技術的情報・データ・知見の交換、教育・訓練、機器・器具・材料の交換、合同会議・セミナー・ワークショップの実施などについて意見交換が行われている。

さらに前述したとおり、中国における核融合の将来計画を検討する「核融合統合設計準備グループ」では、必要に応じて日欧米などの専門家を招聘することとしている。この場などにおいて、日本の専門家が適切なアドバイスを中国人研究者に提供することで、中国を含めた世界の核融合研究レベルの向上や研究協力に貢献していくことが可能と考えられる。

これまでの日中間の協力は、研究者の人的な交流が中心であったと考えられるが、EAST という世界的なレベルにある大型研究装置などを活用して、共同で研究を行い、成果を出していく仕組みを導入することも検討すべきであろう。

（2）共同研究課題

具体的な日中の共同研究課題として、中国側の最大の関心事項は、テストブランケットモジュールの開発における日中協力の可能性である。日中ともに研究を行ってきたヘリウム冷却固体増殖方式のみならず、日本独自の概念である水冷却固体増殖方式、さらには日本が開発したブランケット構造材料についても、中国側は協力への希望を表明している。なお、日本独自のブランケット関連技術はハイブリッド炉に極めて有効なものと考えられるため、ハイブリッド炉による早期の発電を狙っていると思われる中国への協力には、十分留意が必要である。

一方、日本側から希望する協力課題としては、超伝導トカマク EAST に日本人研究者が参加して、超伝導方式特有の炉心制御技術を習得すること、超伝導方式で真空断熱容器に装置全体が覆われているため困難度が増す配管類・ケーブル類などの修理技術や真空漏れなどの保守技術を習得することなどが想定され、世界初の超伝導トカマクである EAST

での共同研究を通じてこれらの技術ノウハウ習得に期待がかけられている。

また、将来的な原型炉の開発には、高速中性子による炉材料の劣化を検証することは不可欠である。日欧は協力して国際核融合材料照射施設 IFMIF の工学実証及び工学設計を進めているが、長期的視点に立ってこれに中国の研究者の招へいも検討するべきと考えられる。

7. 参考文献等

関昌弘編『核融合炉工学概論』日刊工業新聞　2001 年
狐崎晶雄、吉川庄一『新核融合への挑戦』ブルーバックス　2003 年
ジョゼフ・ヴァイス『核融合エネルギー入門』白水社　2004 年
中国科学院プラズマ物理研究所ホームページ
日本原子力研究開発機構那珂研究所パンフレット

第四章　太陽エネルギー「太陽バレー」「サンテックパワー」

科学技術振興機構
中国総合研究センター　フェロー
秦　　舟

1．世界の太陽エネルギー利用

太陽エネルギー利用は、大きく太陽光利用と太陽熱利用に分けられる。太陽光利用は主に太陽光発電となり、太陽熱利用は集光型太陽熱発電及び太陽熱給湯と暖房（太陽熱温水器等）があげられる。太陽エネルギーを、他の水力、風力、バイオマス、地熱等と合わせて自然エネルギーという。

世界のエネルギー供給源をみると、石炭、石油などの化石燃料が全体の 81% を占めている。自然エネルギーは 16%、原子力は 3% である。自然エネルギー 16%のうち、発展途上国で主に調理や暖房で利用される伝統的なバイオマスが 10%、水力発電は 3.4%を占め、残りの 2.8%を太陽熱、地熱、風力などが占めている。従って、太陽エネルギー利用は、まだかなり規模が小さい。

次に電力の供給源をみると、2010 年で世界の総発電容量 4950GW の内、約 1/4 の 1320GW 分は自然エネルギーに由来している。この大半が水力発電によるもので、水力を除く自然エネルギーの発電容量は 312GW となっている。その内、風力発電は最も多くの 198GW となり、太陽光発電は 40GW で、総発電容量のわずか 0.8% に過ぎない。しかし、2005 年から 2010 年の間に、太陽光発電、太陽熱発電、太陽熱温水器などの太陽エネルギー関連分野で、年間平均 15%-50% の高成長率を実現し、特に太陽光・太陽熱発電分野の成長は最も著しく、2010 年の成長率は 70% を超えている。

このように、現在の太陽エネルギー利用は現在のところ供給源としてのシェアは低いものの、今後の成長が期待されている。

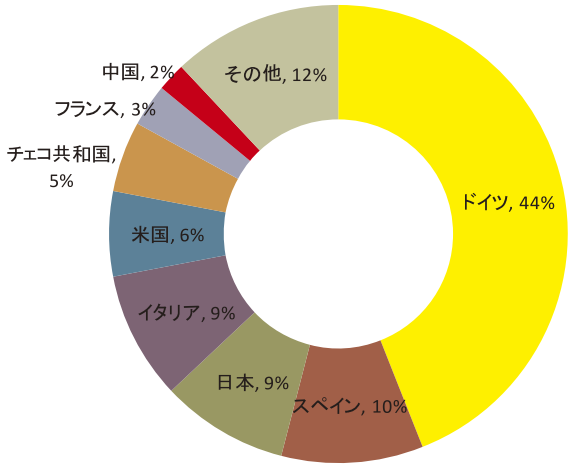
2．中国の太陽エネルギー利用

（1）太陽光発電

図 4－1 は主要国における 2010 年の世界全体の太陽光発電総容量を示している。既述の通り、世界全体の太陽光発電設備容量は 40GW であるが、このうちドイツは 17.3GW で、世界の約半分の太陽光発電容量を有する。日本はスペインに続き 3.6GW の設備容量で第 3 位となっている。その後にイタリアや米国などが続き、中国は 0.9GW（90 万 KW）で第 8 位であり、世界全体の 2% 程度となっている。

ただし、中国のエネルギー中長期計画では、2020 年までに非化石エネルギー消費量を全体の 15% に引き上げ、その内、太陽光と太陽熱発電の設備容量を 20GW、現在の約 20 倍に大幅に引き上げる目標設定となっている。ちなみに日本は 2020 年の目標値は、14GW となっており、日本より意欲的な目標となっている。

図 4－1　主要国の太陽光発電設備容量（2010 年）

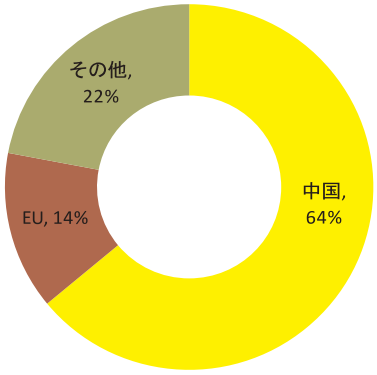


出典：REN21「自然エネルギー世界白書 2011」を基に作成。

（2）太陽熱温水・暖房設備

太陽光発電と比べ、太陽熱発電の規模は遥かに小さく、現在はまだ研究開発段階にあるといえる。一方、直接の熱利用である太陽熱温水・暖房設備の容量は、太陽熱発電の規模よりかなり大きく、2010 年では世界全体で約 185GWth（ギガワット熱）となっている。その内、中国は最も大きく、118GWth で世界全体の 64% を占めている（図 4－2）。その次は、EU 全体の 14% で、中でも特にドイツとトルコはそれぞれ全体の約 5% を占め、日本は約 2% となっている。

図 4－2　世界の太陽熱温水・暖房設備の容量（2010 年）



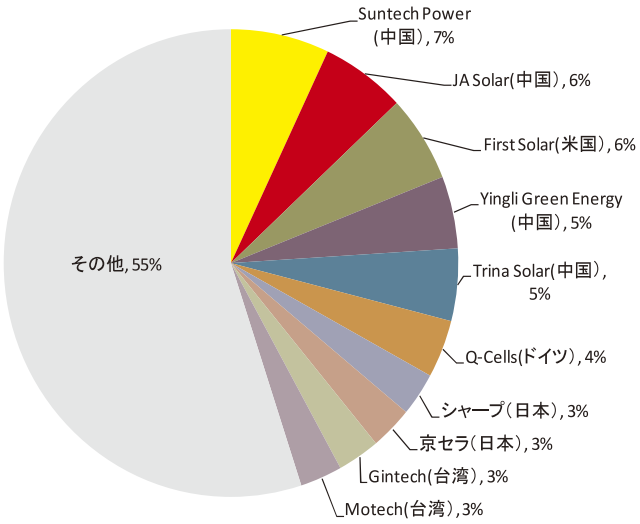
出典：REN21「自然エネルギー世界白書 2011」を基に作成。

（3）太陽電池製造産業

図 4－3 は、太陽光発電に使用される太陽電池モジュール製造業者の世界市場シェアである。この中で台湾企業を含む中国企業は、世界トップ 10 社の中に 7 社が入っている。

後述する江蘇省無錫市に本拠を待つサンテックパワーの市場シェアは、2010 年で世界一となっている。米国の First Solar は、年間生産量が増加したにも関わらず、前年の 1 位から 3 位へと後退した。

図 4－3　太陽電池製造業者の市場シェア（2010 年）



出典：REN21「自然エネルギー世界白書 2011」を基に作成。

なお太陽電池産業において、2010 年では世界の生産量が 2009 年の倍以上に拡大した。この生産量の急拡大は、太陽電池コストの大幅な価格下落をもたらし、2009 年に約 4 割下落したのに続き、2010 年にさらに 14% 下落した。価格の下落は、太陽電池の素材である多結晶シリコン等の供給量の増加と、世界の太陽電池企業、特に中国系企業の製造能力の急速な拡大に起因すると指摘されている。

中国企業の躍進には、主に 2 つの理由が考えられる。1 つは生産能力の大幅な拡大である。2010 年で、世界全体における生産設備増設分の内、中国本土の企業が 50% 近く、台湾企業が約 15% を占めている。また、中国政府による太陽エネルギー関連プロジェクト支援政策により、太陽電池製品の大幅のコストダウンが実現できたことも大きい。

（4）太陽熱温水・暖房産業

太陽熱温水・暖房産業であるが、前述したように、中国は世界全体における利用容量の 64% を占め、また製造業者としても世界の先導的な地位を保っている。中国では、5 千以上の企業が太陽熱温水器の製造に関わっており、およそ二十の企業は海外進出を果たしている。その中で、後述する山東省徳州市を本拠とする皇明集団は、世界最大の太陽熱温水器製造業者となっている。

（5）今回の調査について

今回、上述の世界最大の太陽熱温水器製造業者「皇明集団」と、世界最大の太陽電池生産メーカー「サンテックパワー」の日本子会社「サンテックパワージャパン」を訪問したところ、これらの企業の施設・研究の特徴、優位性、課題等を、現地調査の結果を踏まえて分析したい。なお今回は、中国国内での調査が中心と考えていたが、サンテックパワーだけはどうしても、中国無錫市にある本社でのアポイントを取ることができなかった。従って今回は、このサンテックパワーの概要を知るため、日本にある子会社であるサンテックパワージャパンを訪問した。将来的には、無錫にある本社を訪問することを検討したい。

3. 現地訪問（その 1 ～太陽バレー）

（1）訪問概要：

①訪問日時：2011 年 12 月 21 日−22 日
②訪問場所：山東省　徳州市　太陽バレー
③日本側訪問者：秦　舟　　科学技術振興機構　中国総合研究センター　フェロー
林幸秀　　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　上席フェロー
金子直哉　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　フェロー
④中国側対応者：趙志耘　　中国科学技術情報研究所　副所長
張　旭　　中国科学技術情報研究所　戦略研究センター長
烏　雲　　中国科学技術情報研究所　戦略研究センター研究員
張書鵬　　徳州市　科学技術局長
王学軍　　皇明集団　プロジェクトマネジャー
張立峰　　皇明集団　技術開発センター　チーフエンジニア

写真 4－1　太陽バレー内のホテル入り口にて
左から 3 人目より左へ、張（中）、趙（中）、林（日）、
金子（日）、秦（日）一人おいて烏（中）

© 秦　舟

（2）皇明集団の概要

皇明（Himin）太陽エネルギー集団公司（略称“皇明集団”）は、山東省徳州市に立地する太陽熱開発・利用関連の民営企業であり、1995 年 6 月に設立された。主に、太陽熱温水器、太陽光温熱発電、太陽光エアコン、海水淡水化等に関する開発・生産・販売業務を展開しており、傘下企業の 14 社の内、13 社は中国の主要都市に立地し、1 社は英国にある。また同社は、現在、徳州、南京、英国に研究拠点を構えており、本社従業員数は約

4000 名に上り、年間売上は 20 億元（260 億円）となっている。

皇明集団は、太陽熱低温利用分野の太陽熱温水器の開発・生産に注力し、現在、世界最大の太陽熱温水器製造業者であり、年間集熱面積 300 万 m^2 となる温水器を生産・販売している。中国の内陸の農村地域でも、民家の屋上に「皇明」のマークが付いている太陽熱集熱管がよくみられる。

今後の発展をめざし、皇明集団は 2000 年半ばから太陽熱中高温利用に手を広げ、太陽熱発電開発にも注力している。太陽熱発電の基礎研究を徳州で行い、北京で実施されている大規模な太陽熱発電所建設計画に参画している。

皇明集団は、中央政府や地方政府とうまく連携・協力しており、太陽エネルギー利用関連の大型プロジェクトに参画している。例えば、中国の財政部と科学技術部、国家エネルギー局が実施する「金太陽実証プロジェクト」に、皇明集団が参画している。このプロジェクトは、太陽光発電システムを既存の電力網に接続する発電プロジェクトであり、総投資額の 50%を補助するというものである。また、電力が供給されていない遠隔地において、独立した太陽光発電システムを立ち上げることもこのプロジェクトに含まれており、この場合には総投資額の 70%を補助するものである。

また皇明集団は、太陽エネルギー関連の国際標準の制定業務に参画している。近年、同社が制定に参画した太陽熱分野国際標準として、「全ガラス真空太陽熱収集器」、「家庭用太陽熱ウォーターシステム主要部品選定共通技術条件」、「民用建築太陽熱ウォーターシステム応用マニュアル」、「太陽熱集中温水システムの選定および据付」等、十数件が挙げられる。

創始者の黄鳴氏は、江蘇省泰興市生まれで、1982 年に中国石油大学を卒業して、徳州の油田掘削技術研究所に技術者として働くとともに、個人的に太陽熱温水器の試作を行っていた。1995 年に、100 万元（約 1500 万円）を投資して新星ハイテク科技を買い取り、皇明集団の前身である皇明太陽エネルギー技術研究所を創設し、翌 1996 年に皇明集団を設立した。現在、国際太陽エネルギー学会（ISES）副理事長、中国再生可能エネルギー学会の副会長、中国人民代表大会代表等を兼務して、中国国内では中国太陽エネルギー産業化の第一人者といわれている。

写真 4－2　皇明集団創業者の黄鳴氏

出典：http://it.sohu.com/20040818/n221598503.shtml

（3）太陽バレーの概要

「太陽バレー」は「中国太陽城」と呼ばれており、山東省徳州市北部に位置し、敷地面積は 90 万 m^2 に達する。皇明集団は、太陽エネルギー開発への知名度向上及び地元の地域発展促進のため、2005 年から徳州市政府と協力し、総投資額 8 億ドルでこの太陽バレーを建設してきた。太陽バレーは世界最大の太陽エネルギー研究開発、技術測定、産業、教育、観光拠点となっており、実際、研究開発ゾーン、産業ゾーン、科学普及ゾーン、観光旅行ゾーン、国際会議ゾーンによる「五大ゾーン地域」から構成されている。

オバマ大統領一般教書演説 2011 では、「中国には世界最大の民間の太陽光研究施設がある」との発言があった。この施設は何かであるが、米国等のマスコミは西安に設置されたアライドケミカルの施設と考えたが、中国側では新華社を始め殆どのメディアは、それを今回我々が視察した「太陽バレー（太陽谷）」のことだと考えた。その理由は、投資額や立地面積で大きな差があることからである。西安にあるアライドケミカル出資の「ソーラー・テクノロジー・センター」は、総投資額が 2.5 億ドルで、立地面積が約 3.7 万 m^2 であるのに対して、太陽バレーは総投資額 8 億ドルで、立地面積 90 万 m^2 となっている。

太陽バレーでは、皇明集団、億家能集団等の地元大手企業を中心に、太陽熱温水器、太陽熱給湯システム、太陽熱・光発電、太陽エネルギーと建築の一体化、太陽熱空調、太陽熱ボイラー、エコガラス、海水淡水化等の産業化を進めている。現在、百以上の地元太陽エネルギー関連企業が進出し、年間生産高が一千億元（約 12 兆円）に達し、世界最大の太陽エネルギー産業クラスターとなっている。

写真 4－3　太陽バレー全体像

出典：皇明集団より提供

（4）太陽バレー全般の印象

太陽バレーを実際見てみると、観光スポット的なイメージが強く、大きなテーマパークのように感じられた。扱うものは、太陽熱利用だけではなく、太陽光地熱、風力など多くの自然エネルギー要素が取り込まれている。

先方の紹介では、研究開発において、太陽バレーは世界トップ水準の太陽エネルギー利

用技術を集約しており、干渉膜コーティング、高温熱発電、エコガラス等、太陽熱利用および建築省エネ等に関するコア技術が開発され、年間 500 件以上の新技術が製品化されているという。なかでも、皇明集団の世界初の真空管自動化生産工場、および中国最大のテストラボが注目されているという。しかし、これらの話は説明だけであり、研究現場は今回訪問できなかった。

（5）太陽エネルギーホテル「日月壇」

太陽バレーには、太陽エネルギーホテル「日月壇」が建てられている。「日月壇」は中国太陽バレーのシンボル的な建築物で、皇明集団の投資で建設された。建築面積が約 7.5 万 m^2 に達する。「日月壇」はユニークな形であり、台湾の「日月潭」という有名な湖に似た形から名前が由来する。

写真 4－4　太陽エネルギーホテル「日月壇」

© 秦　舟

日月壇は、展示、事務、会議、研修、ホテル等の機能を一体化し、世界で初めて太陽熱給湯システム、暖房、冷房、太陽光発電等の技術を、建築物と融合させたと言われている。正面屋上全体は太陽エネルギー集熱管に覆われ、ホテル全体の温水、熱供給等がこれで全部補給されている。また、両側の屋上には太陽熱パネルに覆われ、ホテル内の一部の電力供給に使われている。また、建物全体の省エネ率は 70%以上に達し、これに 60%の冷暖房を加えて省エネ効率全体で 88%に達している。中国国内では、太陽エネルギー総合利用技術および建築省エネ技術を結びつけた、模範的な建築モデルといわれている。

2010 年 11 月、皇明集団は太陽バレーで、第 4 回国際太陽エネルギー都市大会をホストしたが、その時のメイン会場がこの「日月壇」であった。今回我々のインタビューも、この「日月壇」の一室で行われた。

外見はユニークで、屋上の太陽熱パネルは殆ど中の温水器と冷暖房供給に使われている。しかし、太陽熱発電について聞いたところ、回答はあいまいであった。恐らく熱供給だけで、熱発電は行われていないと想定される。

（6）集熱真空管工場と屋上の太陽熱発電設備

同じ敷地内にある皇明集団の集熱真空管工場は、生産ラインの全自動化が実現され、年産が二千万セットに達している。

写真 4－5　皇明集団集熱真空管生産ライン

出典：徳州新聞網（www.dezhoudaily.com）

この工場の屋上には、太陽熱による発電設備が設置されている。徳州市の日照時間のデータに基づき計算すると、年間発電量は全てのスペースに設置された場合に約 525 万 Wh に達し、3600 戸の家庭が 1 年間に用いる電力を供給できる。この設備に用いられている技術はフレネル型太陽熱発電技術で、反射鏡を利用して太陽熱を収集し、その熱により蒸気を発生させてタービンで発電を行うものである。皇明集団は、このフレネル型太陽熱発電技術に関し、100%の知的財産権を持っているという。

ただ、今回は工場内部の見学ができず、車から屋上の建設中の太陽熱発電施設を見学しただけであった。その後、皇明集団より提供された写真 4－6 で見ると、2010 年に設置が始まって 1 年以上経過しているが、太陽熱パネルは屋上スペースのほんの一部にしか設置されていないことが判る。まだまだこれからという感じである。

太陽熱発電は太陽光発電に比べ、原理が簡単なものの工程は複雑なため、設置に手間取っている可能性がある。

写真 4－6　工場の屋上に設置された太陽熱発電施設

出典：皇明集団より提供

（7）検査センター

皇明集団の高い技術力を示すものとして、現在 18 の太陽熱温水器関連技術検査センターを持ち、2009 年 1 月、中国合格評定国家認可委員会の許可を得て、国家承認の技術検査機関となった。中国全国の太陽熱温水器の品質評価を管理し、原材料・部品・完成品の検査項目が千件以上に達している。同センターが発行する検査報告は、中国国内はもちろん、米国、英国、オーストラリア、ドイツ、日本等の主要貿易国 45 カ国で承認されている。

今回この検査センターをいくつか見学できた。外見的にはかなり広い感じであった。建物一階に、写真 4－7 のような窓ガラスで囲まれた実験室が、建物のワンフロアに 20 以上並んでいた。

我々が見学した際には、研究者や検査員などの姿は見あたらず、閑散としていた。また、検査を受けるはずの物品が大量に置いてある状況でもなかった。たまたま、スケジュール的に暇な時期だったのかもしれないが、それにしても、中国全土の温水器の品質評価を管理するとともに、日本や米国などにも承認されているというふれこみにしては、寂しい状況であった。

写真 4－7　検査センター

© 秦　舟

（8）皇明集団の技術

現地でインタビューした皇明集団技術開発センターの張立峰チーフエンジニアの話や、その後提供を受けた資料などを総合すると、皇明集団の技術の強みは以下のようにまとめられる。

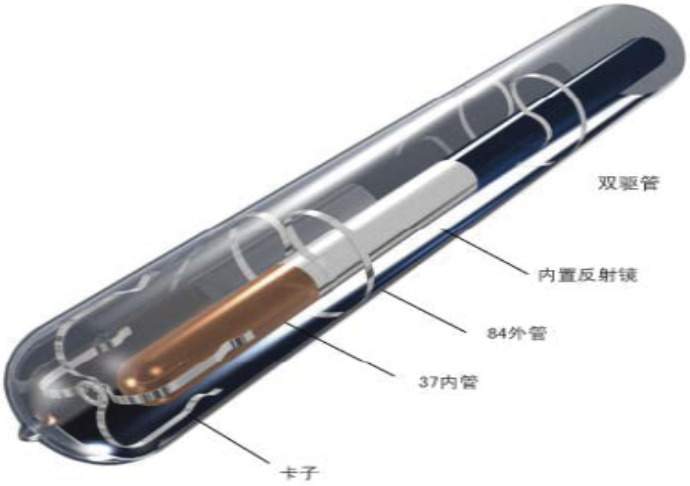
従来の太陽熱温水器には「冬の水温が上がらず、温水量が減少する」という「冬眠症」問題が存在した。この「冬眠症」の原因はさまざまで、保温層の保温効果低下、パイプの凍結等があるが、最も大きな問題はコア部品である集熱真空管の熱収集不足だという。

集熱真空管の性能はコーティング技術にかかっているため、皇明集団はこの問題の解決をめざし、2002 年、シドニー大学の章其初博士の特許であるコーティング技術「干渉膜技術」を買い取り、引き続きシドニー大学、独・フラウンホーファー研究所との共同研究により、製品レベルの集熱真空管を開発してきた。

それまでの集熱真空管は、熱吸収性能を高めるため、熱吸収層となる多層化した熱膜層を持っていた。多層化熱膜層を持つ集熱真空管は、熱吸収性能が高まる反面、放熱比（吸収されない熱の比率）も大幅に上昇し、外に放出された熱は熱膜層の脱落を起こすことになる。熱膜層の脱落は結果として、集熱真空管全体の熱収集不足をもたらし、温水器の使用寿命も縮めることになっていた。

それに対して干渉膜技術は、熱膜層 2 層のみであるが、2 層は異なる金属成分比により互いに干渉作用を起こし、吸収率を大幅に高め放熱比を下げることができる。さらに光反射を減少させる層により、光反射と放熱を低減し、高吸収率・低放熱比を実現し、熱収集効率を高めた。また、熱膜層を厚くすることにより、2 層のみでも高温環境下において、その安定性が保てる。この干渉膜技術により作られた皇明集団の集熱真空管は、それまでの集熱真空管より熱吸収率を 10% 以上高めることができたという。

写真４－８　皇明集団の集熱真空管



出典：皇明集団より提供

先述した皇明集団の集熱真空管工場の全自動生産ラインで、この集熱真空管は年間二千万本ペースで量産化されている。また、タンクなど温水器の他の部品の設計･製造や、温水器の組み立てなども、全て皇明集団が自社で実施している。

(9) 皇明集団の課題

2層化である干渉膜技術について、日本のメーカーの意見を聞いたところ、皇明集団のコーティング技術はそれなりのものとは評価ができるが、世界の他のメーカーと比較して差があるとはいえないとのことであった。ただし製品価格が断然安いことに、皇明集団の優位性があるということでもあった。今後は、中国国内を含む他のメーカーとの競争に打ち勝つためには、さらなる研究開発が必要と考えられる。

皇明集団は、地域振興のため、地方政府を共同投資で太陽バレーを建設することで、地方政府から多くの太陽熱関連建設プロジェクトを目指していると考えられる。その一環と考えられるのが、不動産開発と一体となった太陽熱利用の促進である。今回我々は、太陽バレーに立地する太陽熱利用マンションを見学した。徳州の郊外に位置し、太陽エネルギー利用を売りとするマンションを数棟建設している現場である。この様なプロジェクトは、地方政府のプロジェクトとしても重要と考えられているせいか、地方政府から優遇措置が講じられているという。しかし現場で見た限りにおいては、マンションはそれほど売れておらず、買い手の姿も見当たらなかった。

このような地域振興策が、果たして本当の意味での地域の経済振興につながるかという疑問も残る。現在皇明集団はこのような形の補助政策で優遇されているが、これに頼りすぎると政府の政策変更があった場合にその影響をもろに受けることとなる。皇明集団は、中国最大の太陽熱関連企業となったのであるから、このような優遇策を受けなくても、企業として発展するための戦略を考える必要があろう。

写真４－９　太陽熱利用マンション

© 秦　舟

皇明集団は、これまで培った太陽熱温水利用技術を生かして、太陽熱発電を事業の拡大のターゲットとしている。具体的には、既述の屋上太陽熱発電施設の他、北京の郊外で科学院の研究所と大型太陽熱発電施設を共同建設中とのことである。太陽熱発電開発は、今後の皇明集団にとって大きな試練とも言える。

４．現地訪問（その２～サンテックパワージャパン）

（1）訪問概要

①訪問日時：2012 年 5 月 28 日
②訪問場所：サンテックパワージャパン本社
③日本側訪問者：秦　舟　　科学技術振興機構　中国総合研究センター　フェロー
④企業側対応者：三澤邦子　サンテックパワージャパン
　　マーケティング本部　ゼネラルマネジャー

写真 4－10　サンテックパワージャパン本社入り口にて

© 秦　舟

（2）サンテックパワージャパンの概要

サンテックパワージャパン（以下「SPJ」と略す）の前身は、日本の MSK 社である。1967 年に電子部品メーカーとして創業された MSK 社は、81 年に太陽エネルギー電卓の開発・販売を始め、90 年から太陽光モジュールの開発を始めた。MSK 社の笠原唯男社長とサンテックパワーの創業者施正栄氏は、当時から太陽エネルギー関連学会・イベントで顔を合わせた旧知の仲であった。2006 年にサンテックパワーは MSK 社の買収を開始し、2009 年には MSK 社は SPJ と社名変更し、サンテックパワーの 100% 子会社になった。

買収前は、MSK 社はモジュール、サンテックパワーはセルの研究開発に、それぞれ強みをもっていたが、SPJ となってからは日本顧客向けの販売法人となり、研究開発を行わずアフターサービスと完成品テスト等を実施しているという。そのため、元 MSK 社の長野工場は SPJ アフターサービスセンターに変身し、現在テストラボを建設中で、2012 年 7 月に「長野テクニカルサポートセンター」としてリニューアルする予定となっている。

（3）サンテックパワーの概要

サンテックパワー（中国語の正式名称は、「無錫尚徳太陽能電力有限公司」）は、江蘇省無錫市に立地するハイテク太陽エネルギー企業であり、2001 年 1 月に設立された。同社は、結晶シリコン太陽電池およびモジュール、太陽光発電システム、その他太陽光応用製品における、研究・製造・販売等を主な業務としている。同社の傘下企業は、北京、上海、サンフランシスコ、東京、ミュンヘン、ローマ、マドリード、ソウル、シドニー等の世界主要都市に点在する。また同社は、現在、無錫、洛陽、青海省、上海、長野県に生産拠点を構えており、従業員数はおよそ 1 万 1000 人に達する。また年間売上は 31.5 億ドル（約 2400 億円、2011 年）となっている。

創業者の施正栄博士は、江蘇省鎮江市揚中出身で、1988 年にオーストラリアに渡り、ニューサウスウェールズ大学で太陽エネルギー分野の権威マーティン・グリーン博士に師事し、91 年に博士号取得した。2001 年 1 月に帰国し、同年 9 月サンテックパワーを設立し、CEO となった。施正栄氏は、この時点でオーストラリア国籍を取得していたため、

中国国内ではサンテックパワーは外資企業として登録された。

写真 4－11　サンテックパワー創業者の施正栄氏

出典：http://image.baidu.com/

サンテックパワーは 2002 年 9 月、多結晶シリコン太陽電池生産ラインを稼働させた。当初の生産規模は小規模で、生産量は 10MW にすぎなかった。その後生産ラインを急激に拡大し、二年後の 2004 年 8 月には 5 倍の 50MW、2005 年には 150MW、2006 年には 300MW と世界有数の太陽光発電メーカーとなっていった。その間の 2005 年 12 月 14 日、サンテックパワーは中国の外資系民営企業として初めてニューヨーク証券取引所で上場を果たし、同年、アジア企業トップ 100 にランクインし、太陽電池分野では世界 6 位となった。

2011 年 9 月に、サンテックパワーの生産規模は約 2400MW に達し、太陽エネルギー製品・太陽電池における世界最大の製造メーカーとなった。

サンテックパワーの現在の主な競合他社は、シャープ、京セラ、独 Q-cells だという。

（4）サンテックパワーの強み

SPJ の三澤氏へのインタビューの結果を踏まえた、サンテックパワー本社の特徴と強みは以下の通りである。

①グローバルな経営

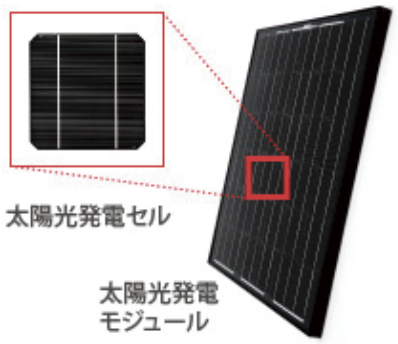
既に述べたように、創設者施正栄氏はオーストラリアの国籍を取得しているため、サンテックパワーは中国で外資企業として登録されたことや、2005 年に中国の外資系民営企業として初めてニューヨーク証券取引所で上場を果たしたことなどから、サンテックパワーは単なる中国の企業としてではなく、グローバルな企業として活躍しようとする意欲が強い。現在、サンテックパワーの傘下企業は、サンフランシスコ、東京、ミュンヘン等の世界主要都市に存在している。さらに、技術関係の責任者となる CTO には、ニューサウスウェールズ大学のスチュアートウェンハム教授が兼任し、経営、財務関係の CCO と CFO にも経験豊富な米国人が就任していることからも判るように、グローバルな経営体

制となっている。

②世界トップレベルの技術力

太陽光発電モジュールの製造に最も重要なのは、変換効率の高いセルの開発である。セルというのは太陽光電池一枚一枚のことで、モジュールというのは数十枚のセルを一枚のパネルに取り込まれた装置のことである。

図 4－4　太陽光発電モジュールとセル



出典：サンテックパワージャパンのホームページより

セルの変換率というのはセル一枚当たりに注ぐ太陽光をどれだけ電気に変えられるかを示す比率のことであり、現在（2010 年）の実験室の世界記録（単結晶シリコンセル）は、約 25% となっている。このセル変換効率の世界記録をもっているのは、サンテックパワーの CTO を兼務している豪州ニューサウスウェールズ大学のスチュアート教授の研究室である。同研究室は 80 年代から、米国スタンフォード大学（米サンパワー社の委託）と競争して、セルの変換効率を高めてきた。この研究室レベルの変換効率の高いセルを工場で量産するため、サンテックパワーは無錫本社に 380 人の研究チームを設置している。そして、独自のセル表面設計・表面加工技術を開発するとともに、生産設備の設計能力を高めた。つまり、研究室レベルのセルに、独自の表面加工技術を加え、変換効率の高いセルを安定して量産化できる生産設備を設計・製造し、生産規模を急激に拡大してきた。

一方サンテックパワーは、コストの小さい薄膜太陽電池の開発･生産にも注力している。2006 年、上海に薄膜太陽電池研究・製造センターと立ち上げ、2009 年に四川大学の光電研究所と合弁企業を設立した。同社では、CdTe（カドミウムテルル）型太陽電池の開発を進めている。

SPJ の三澤氏によれば、2006 年に買収された当初、旧 MSK 社の関係者達には戸惑いがあったという。一般的に、中国企業は研究開発や品質管理等に全く手をかけず、低品質のものを低価格で大量販売というイメージが強かったからである。しかし、サンテックパワーの技術力を知り、世界最大のモジュール生産・販売企業の一員となってみると、サンテックパワーに MSK 社が買収されたことは間違いではなかったと現在思っているという。

③世界販売力

サンテックパワーの最大の強みは、世界市場における競争力である。サンテックパワー

は国際人材力を生かし、徹底した海外現地販売戦略とアフターサービス強化方針で、中国で製造したモジュールを世界各国に輸出してきた。サンテックパワーは2001年創業以来、累計、世界80ヶ国以上に二千万枚以上のモジュールを出荷し、2010年にはついに世界シェア1位となった。販売先の国別ではドイツ、フランス、米国等が得意先であり、これら三カ国で1位の市場シェアを獲得しているという。また、製品の多くは世界各地の太陽光発電所の部品として使われている。

（5）サンテックパワーの課題

①赤字転落

サンテックパワーは2010年に、世界シェア1位を獲得したにもかかわらず、2011年では、約6.5億ドルの赤字を出している。SPJの三澤氏によれば、原因は以下の3つと考えられるという。

一つは、急激な生産規模の拡大による投資の重みである。2010年の生産規模1.8GWに対して、0.6GW分の追加設備投資を行い、2011年に生産規模を2.4GWにまで拡大した。しかし、リーマンショックやユーロ危機などの影響を受け、太陽電池市場が予想の規模拡大にはならなかったため過剰設備となり、結果として投資が経営を圧迫することになった。そのため2012年は生産規模の拡大を行わず、2.4GW体制を維持することにしている。

二つ目は、材料調達先の変更に伴う違約金の支払いである。従来サンテックパワーは、10年契約に基づいて米MEMC社から結晶シリコン材の供給を受けていたが、もっと低コストのシリコン素材を確保するため他社の供給を考え、米MEMC社との契約を5年間で停止した。これに伴い膨大な違約金を払うことになった。

最後は、モジュール世界市場価格の下落による利益減である。現在の太陽電池メーカーの市場競争が非常に厳しく、中国、米国、日本などの主要企業が市場シェアを奪い合っている状況である。また、世界各国から多くの新規企業が参入し、素材、部品メーカーも含め、価格競争が一層厳しくなってきている。

②ブランドイメージの低さ

現在、太陽電池市場は厳しい状況にある。ドイツ、米国の企業が相次いで倒産したというニュースも流れている。米国では、米国企業の倒産は中国企業に対する政府補助金による低価格戦略に敗北したものだという考えが根強い。しかし三澤氏によれば、中国政府の支援策の効果は大きいものの、サンテックパワーは低価格戦略のみで世界の市場シェアを獲得しているわけではないとしている。例えば日本市場において、サンテックパワーのモジュール製品の価格はシャープ等の競争他社とそれほど差がなく、他社より優位と考えられるのは、長い使用年数を保証できる品質とアフターサービスの充実であるという。

ただ、SPJ販売員が一番苦労しているのは、中国製品のブランドイメージの低さである。日本の地元企業の強さもあって、SPJの日本市場シェアは現在約6%で、今後もこの市場シェアの拡大はSPJの最大目標だという。前述したように、サンテックパワーは他の中国民営企業と違って、研究開発も経営もグローバルであり、太陽電池セルやモジュールの開発・設計に大きな資源を投じている。

③開発能力の向上

地元工場の人件費の安さ、中国政府の優遇策などを考えると、外国トップメーカーと同レベルの製品を製造しているとしても、原価は安いはずである。それでも赤字を出しているのは、現在世界市場の競争の厳しさを象徴している。市場競争に勝ち残るためには、モジュール構成素材の研究開発に注力すべきであるというのが、現在のサンテックパワーの考え方である。

日本の太陽エネルギー研究の専門家である、科学技術振興機構研究開発センターの河村誠一郎フェローによれば、サンテックパワーの研究開発に関し、太陽電池セル基盤技術と量産化技術について以下のようにコメントしている。

セル技術（変換効率）について、豪州ニューサウスウェールズ大学の技術をベースにした高い技術を保有していることは共通認識となっており、これは中国メーカーの中ではトップであるといえる。ただし、この技術の優位性が事業に結びついていないのが実態であり、サンテックパワーは量産品への展開という点で他社とそれほど大きな差があるとは思えない。現時点では低コスト故に、市場シェアを獲得しているのが実態であろう。

④調達と自社開発のバランス

サンテックパワーは、高品質な太陽電池モジュールの構成素材を世界各地からカスタムメードで調達できるという強みがあるが、高い設計能力を持っていることを考慮すれば、中間膜、ガラス、バックシートなどの素材を自社開発してコスト節約につなげることも考えられる。現在高品質な構成素材はかなり高価格であり、サンテックパワーもその調達にかなりの資金を投じている。研究開発、及びそれに伴う設備投資には人材と資金力が必要となるが、長期的に考えると原材料・構成素材も含む自社開発能力の向上が大きな課題となるであろう。

5. 参考文献等

科学技術振興機構中国総合研究センター「中国の第十二次五ヵ年規画における緑色発展の実態と動向」2011 年
REN21「自然エネルギー世界白書 2011」2011 年

第五章　エコシティ

東京理科大学特命教授
兼　科学技術振興機構研究開発戦略センター
特任フェロー（海外動向ユニット）
和　田　智　明

1. エコシティの意義

国連経済社会局の予測によれば、2050 年には世界人口の約 70%が都市エリアに住むとされている中で､現在世界の様々な国で環境都市（エコシティ）の建設が計画されている。特に、中国やインド、東南アジアを中心に経済発展の著しい国において、低炭素や資源循環、環境負荷の低減等の面を重視して都市を建設する取り組みが進められている。米国ではスマートグリッド技術の開発実証が進められており、ヨーロッパではスウェーデン、デンマーク等で実証試験が行われると同時に、都市改良の技術・手法をパッケージで輸出しようとしている。日本においては、北九州、豊田、けいはんな、横浜におけるスマートコミュニティ実証試験が昨年度からスタートしており、環境未来都市構想も 11 の都市・地域でスタートしている。このような世界でのエコシティ推進の動きのベースになっている思想は、以下の 3 つの価値創造の観点である。

第一は、環境価値の創造である。低炭素技術、新エネルギー技術の実証だけではなく、水循環、大気環境問題への取り組み、生物多様性の確保等により、都市の環境価値を維持、向上させようということが基本思想にある。また新たに都市を開発する場合には、最適な施設配置や新技術の一斉導入など、個別の取り組みだけでは難しい効率的な取り組みが可能となり、効率的に価値創造ができる。

第二は、経済的価値の創造である。エコシティのコンセプトを掲げることにより、環境配慮型企業や新産業の立地を行い、住民の安定的な雇用、所得につなげるとともに、更なる都市化、加えて観光にも結びつけていこうとする考え方である。

第三は、社会的価値の創造である。新産業や環境配慮型企業の誘致で職住近接を図るとともに、エコ意識の高い住民がエコ住宅に居住することと、健康、介護、教育、文化等のための施設の創出により、高齢化にも対応した安心・安全な社会を創造することである。この結果、地域内で住宅、商業、産業、公共施設等の機能が集約したバランス型都市を創造することができる。

このような世界のエコシティの動きについては、今後も注視していく必要があるが、今回は中国のエコシティの調査結果について、以下に述べる。

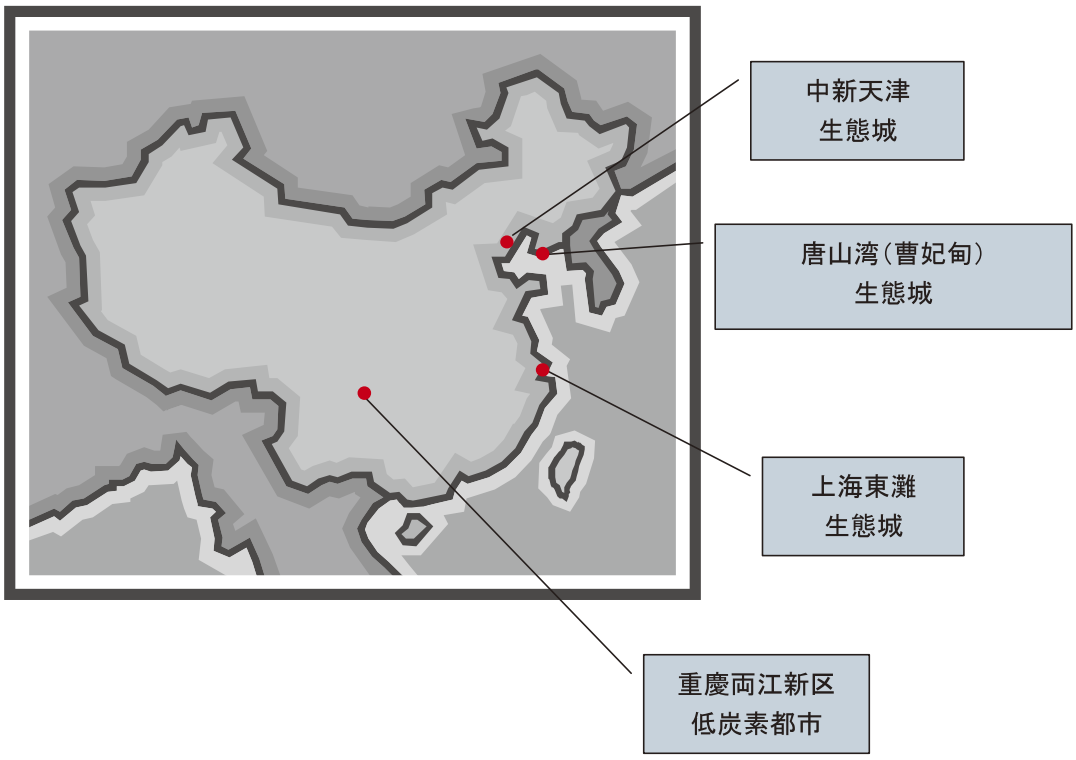
2. 中国のエコシティ

中国では、農村部からの人口の流入により急速な都市化が進展しており、2020 年には人口 100 万人以上の都市が 200 以上になると予測されている。このような都市人口の急増に対応して、雇用の創出や住宅の確保など新たな都市開発が喫緊の課題となっており、現在、環境配慮やエコを理念として掲げる「エコシティ」計画が、全国各地で進められている。その数は 200 近くに上り、「低炭素都市開発」（国家発展改革委員会）、「エコ工業

園区」「環境保護モデルシティ」（環境保護部）、「スマートグリッドパーク」（中国国家電網）、そして主に各地方政府が自主的に進めている「生態城（エコシティ）」等の計画が併存し、モデル事業としていささか乱立気味の状態にある。

今回、そのような数あるエコシティ建設計画の中で、規模が大きく歴史があり国家・省レベルの何らかの関与が認められるモデルのうち、地域性（南北沿岸部、内陸部）も考慮して 4 地域を選び、プロジェクトの概要（開発の経緯・政策上の位置づけ、環境上の達成目標、進出企業等の状況等）と、グリーンエネルギー等新技術の導入計画を中心に調査することとした。参考までに、今回調査した 4 つの位置を、図 5－1 に示す。

図 5－1　今回調査したエコシティの位置



© 和田智明

3. 現地視察（その 1 ～上海東灘・陳家鎮生態城）

（1）訪問の概要

①訪問日時：2012 年 3 月 6 日
②訪問場所：上海東灘・陳家鎮生態城（Shanghai Dongtan Chenjia Eco City）
　　上海東灘・陳家鎮生態城エネルギー管理センター
③日本側訪問者：

和田智明	東京理科大学特命教授　研究開発戦略センター特任フェロー
伊藤宗太郎	文部科学省科学技術政策研究所総務研究官
馬奈木俊介	東北大学特任教授
趙晋平	科学技術振興機構中国センター

④中国側対応者：

上海東灘建設発展有限公司・梁総経理
上海陳家鎮建設発展有限公司・張博士
上海建科院崇明低炭課題組・港顧問

写真 5－1　上海東灘生態城にて
左より、趙（日）、張（中）、伊藤（日）、梁（中）、和田（日）、馬奈木（日）

© 和田智明

(2) プロジェクトの経緯

「上海・東灘生態城」は、中国初のエコシティ計画であり、上海郊外の崇明島での建設が計画された。崇明島（面積 1200km^2）は、太平洋に面した長江河口に位置し、上海・浦東地区と海底トンネル（8.9km）と大橋（10.3km）で結ばれた湿地帯の島である。

2001 年、英国の Arup 社がエコシティを全体設計し、事業主体を上海実業（集団）有限公司が担い、2008 年の中国・英国間環境協力の枠組みにも盛り込まれ、内外の関心を高めた。しかしながら、関連事業者間の資金拠出の問題、プロジェクトの推奨者であった上海市元書記の失脚、2008 年に発生した金融危機による企業戦略の見直し等により、2012 年 3 月現在、着工の目途は立っておらず、計画中止の危機に瀕している。

なお最近のニュースでは、この「上海・東灘生態城」計画は 2012 年 2 月に正式に再開が決定され、住居計画に老人用健康住宅を含めるなどの計画変更が加えられたとの情報もあるが、未確認である。

このような状況を横目に、企業主導ではなく鎮政府（日本での市町村に相当）主導でのエコシティ建設の気運が高まり、地元「東灘・陳家鎮」が自ら 9 億元を投資して設立した郷鎮企業による新たなエコシティの開発計画（以下､「新エコシティ」と言う）が始まった。

新エコシティの開発は、上海市内に比べて収入が四分の一しかなかった地元住民の雇用機会の創出、農業に適さず他の産業もない島の現状からの脱却を、地元政府が意図したも

のである。これに、湿地帯特有の多様な鳥類の生息する生態系の保護をキーワードとして加え、生態環境を重視するというイメージの下での街づくりを目指した。よって、新エコシティの計画はあくまで地域開発が主眼であり、今後の進展次第では看板としてのエコの精神がどこまで徹底されるか不透明な要素があることは否定できない。

（3）新エコシティの概要

新エコシティは、生態系保護区を含め全体面積 224km^2、うち約 40km^2 に新たなシティが建設される予定である。シティ内には産業区（①国際エコ実験ゾーン、②高等教育ゾーン、③国際会議・ビジネスゾーン、④知識情報産業ゾーン）、住宅区、スポーツ施設区、レジャー施設区が建設され、最終的には地域全体で 62 万人（2020 年までに 22 万人）の人口を擁する大型都市コミュニティに発展させる計画となっている。

現在までに、計画のうち産業区の国際エコ実験ゾーンにおいて、「エネルギー管理センター」（エコシティ全体の計画管理事務所を兼ねる）が竣工しており、先端的なエコ技術を導入したビルの建設・運営によるエコシティ全体のイメージ作りのためのショールームの役割を担っている。

写真 5－2　エネルギー管理センター（竣工済み）

© 和田智明

（4）新エコシティの環境理念

新エコシティに対する環境上の達成理念として、①低炭素環境保護型の産業、②高効率のエネルギーシステム、③省エネ・省資源の生活、④生態系に優しい都市開発、⑤クリーンで高効率な交通システム、⑥低炭素省エネ建設、⑦循環型都市施設、などを掲げている。

具体的な目標は、現段階においても必ずしも明確ではなく、既に対外的に表明されている「上海・東灘生態城」計画における環境目標（下記の参考）を現実的に見直し、国際エコ実験ゾーンにおける実績とシティ全体の今後の計画の進展を踏まえて、具体的に決定していく方針とのことであった。

（参考）「上海・東灘生態城」計画における環境目標

① エネルギー：風力（海上に中国最大のウィンドファームを建設）、太陽光及びバイオマス燃料による発電を実現。CO_2 の排出量はゼロ、一般的な上海市民に比べてエネルギー使用量 64%を削減する。
② 汚水処理：汚水は再生利用し、水使用量 43%、汚水排出量 88%を削減する。
③ ゴミ処理：ゴミは地下の密閉された配管を通して再利用・処理工場へ輸送し、ここで化学肥料とバイオマスエネルギーに変換。固形ゴミの 80%をリサイクルする。
④ グリーン交通:域内の主な交通手段は燃料電池バス、電動スクーター、自転車とし、自動車からの CO_2 排出量をゼロにする。

（5）新エコシティ内の各種取り組み

①先端的なエコ技術の導入

既に竣工している「エネルギー管理センター」では、清華大学及び上海建築科学院との協力により、先端的なエコ技術の導入を実現しており、この成果を将来的に評価し新エコシティ全体に反映していく方針である。なお､同評価においては科学技術面のみではなく、実用性・快適性についても重要な項目として評価するとのことであった。

具体的には、

・建設にあたり 75% の省エネ
・再生可能エネルギーの利用率 40% 以上
・廃棄物・汚水排出ゼロ
・CO_2 の排出量は 50% 削減等の実現　を目標としている。

同センターは建築上の様々な工夫が施されており、窓の設置率を 50% として採光・通気を促進、空調には地熱ヒートポンプを利用、空調送風管の毛細血管的な配置による熱交換の高効率化、太陽発電 75Kw、風力発電 50Kw、空調・照明のコンピューター制御、汚水・雨水の蓄積再利用などを試みている。

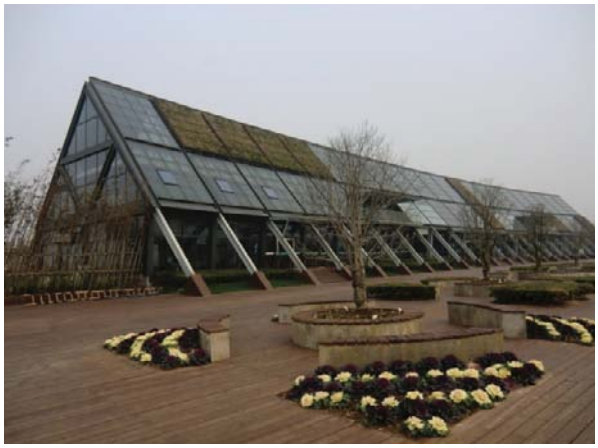
また、生態系への配慮に力を入れており、上海園林研究所との協力により、センタービル周辺の植林についてもその種類・量を周辺の生態系に影響のないものに制限し、道路にも小動物の移動用のトンネルを設けている。

ただ、新エネルギー技術等の導入については、同センターの実験施設内または計画に留まっており、エコシティに普及させるためには、今後相当の努力が必要と思われる。

②野鳥保護ゾーンなど

湿地帯の野鳥保護ゾーンについては、既に屋根全面に太陽電池パネル（中国製）を設置した観察施設と、風力発電施設（ドイツ NORDEX 社製）が設置された公園地区が出来上がっており、週末には上海からの観光客も訪れるとのことで、環境保護普及施設としての役割も果たしている。

写真 5－3　野鳥保護ゾーンの太陽電池パネルと風力発電施設



© 和田智明

© 和田智明

③居住地区等

新エコシティの産業区には、そもそも汚染の少ない情報知識産業を誘致したいとしていることから、他の住居地区等において、いかに環境上の目標が貫けるかがポイントとなる。エコの実現は、住宅・ビル建築コスト、新エコシティ全体の運営コストの上昇にもつながり、これに対応する具体的な考え方等は説明されなかった。

スマートグリッドによる省電に関しては、上海電力科学研究所との協力を開始し、実験的な取り組みを実施している。

新交通システムに関しては、上海万博で利用した電気自動車の一部を新エコシティに譲り受け、EV 普及の実験に取り組んでいくこととしている（EV のレンタル事業を既に開始)。将来的には上海から鉄道等の大量輸送で運ばれた住民を、駅からは EV で目的地に移動させる計画となっている。

新エコシティの高等教育ゾーンには、上海外国語大学、同済大学の UNEP プロジェクトが新キャンパスを設置する方向で調整中である。

新エコシティに関する外国との協力は、日本企業の進出を含めこれまでのところない。外国企業は、現在中断している「上海・東灘生態城」計画の教訓から、新プロジェクトの実現可能性について判断しかねているものと考えられる。

4. 現地視察（その２～中新天津生態城）

（1）訪問の概要

①訪問日時：　2012 年 3 月 8 日

②訪問場所：　中新天津生態城（Sino-Singapore Tianjin Eco-city）中央管理棟

③日本側訪問者：

和田智明	東京理科大学特命教授　研究開発戦略センター特任フェロー
伊藤宗太郎	文部科学省科学技術政策研究所総務研究官
馬奈木俊介	東北大学特任教授
渡辺泰司	科学技術振興機構北京事務所長
趙晋平	科学技術振興機構中国センター

④中国側対応者：
張署長　　中新天津生態城商務局

(2) プロジェクトの概要

「中新天津生態城（Sino-Singapore Tianjin Eco-city）」（以下「天津エコシティ」と呼ぶ）は、天津市内から 45km の距離にある渤海沿岸地区に位置し、塩田跡の埋め立て地に建設中の、中国におけるパイオニア的エコシティである。トヨタほか多くの日本企業が進出している「天津経済技術開発区」（「国家エコ工業園区」にも指定されている）に隣接し、同開発区で働く従業員の居住地域開発としての色彩が強い計画となっている。計画の初期段階から、中国政府とシンガポール政府の共同プロジェクトとして進められており、中央政府主導（天津は温家宝現総理の出身地でもある）の国家級エコシティ計画として、内外から注目されている。

写真 5－4　天津エコシティの完成予想模型

© 和田智明

天津エコシティの総計画面積は約 30km^2、2008 年に建設を開始し、約 10 ー 15 年をかけて完成する予定となっている。完成時の居住人口は 35 万人、エコシティ内で 10 万人の新たな雇用を創出する計画である。天津は北京から 150km の距離にあるが、30 分毎に運行される高速鉄道によって所要時間 30 分で結ばれており、また高速道路も整備されていることから北京通勤圏とも言える。

当初、シンガポール政府側から中国政府に対してエコシティ建設が提案された。これを受けて中国政府が候補とした 4 都市の中から事前評価が行われ天津市が選定され、2007 年、両国総理間で建設協力協定が結ばれている。具体的な建設事業は、天津 TEDA 投資ホールディング有限公司とシンガポールのケッペルグループによる合弁会社によって運営されており、天津市政府が設置した中国・シンガポールエコシティ管理委員会がこれを指導している。

投資面では、中国、シンガポール双方からの同額出資を主な資金源としており、中国側からは 600 億元相当の土地が現物提供された。その後、同土地代が 2,000 億元まで上昇したため、シンガポールからこれに見合う追加投資が実施されている。現在、利益が出ているのは主に不動産開発分野であり、シンガポール政府は進出する自国企業に補助金を与えることとしており、中国側も進出企業に対する地方税の減免措置などの支援策を打ち出し誘致を促している。

天津エコシティは、中国政府とシンガポール政府共同の国家級エコシティ計画として、内外から注目されている。他方、天津は温家宝現総理の出身地でもあり、現政権の肝いりのプロジェクトとの見方も出来る。2012 年秋の政権交代を控え、既に現地の説明ボードに次期国家主席候補（習近平）の視察写真を掲げるなど配慮をしている。

（3）環境上の達成目標

天津エコシティは、明確な環境目標を設定したことで高く評価されており、「生態環境の健全性」「社会の調和と進歩」「活発で効率的な経済活動」「地域の協力と融合」の 4 項目の目標と 22 の達成すべき指標が掲げられている。22 の指標は、具体的な数値目標と達成の期限を示しており、例えば「水道水の基準の 100%達成」（近い将来）や「経済生産あたりの CO_2 排出量は 150t/100 万米ドル」（近い将来）、「1 人当たりの水消費量は 120 ℓ / 日以下」（2013 年）、「グリーンな交通手段（車を使わない）の占める割合 90%以上」（2020 年）、「再生可能エネルギーの利用率 20%以上」（2020 年）などである。

これら目標の設定にあたっては、実現可能性、複製可能性及び普及可能性を重視しており、天津エコシティにおけるモデル事業としての成果を、今後中国全土に普及するとの発想が強く感じられる。

天津エコシティの完成は 2020 年を計画しており、その段階で両国の副総理レベルで構成する評価委員会において目標の実現度合いを審査することとなっている。

（4）進出企業等の状況

現在、第 I 期投資区域（約 $4km^2$）が建設中であり、中国国有企業、シンガポール、香港、マレーシア、台湾、日本などの企業が開発に参入している。同区域内の居住施設には 2012 年 5 月から入居が始まる予定である。エコシティの開発は全体をⅣ期に分けて進められており、最終的には住宅用地（40%）、産業用地（10%）、商業用地（4%）、その他公園緑地等となる。

写真 5－5　建設中の住居用施設

© 天津生態城

居住者の 50%は、隣接する経済技術開発区で働く従業員とその家族を想定している。但し、エコシティが完全なベッドタウンとならないように、エコシティ内でもクリーンな産業を興し、エコシティ住民の 30%程度の雇用を目指している。このため、エコシティ内には既に「国家アニメーション基地」が建設され、79 社、約 2,000 人が働いている。

日本企業も同エコシティの建設に関与しており、日本総合研究所が再生可能エネルギーの特定プロジェクト計画作りに参画、日立製作所も天津エコシティのビジネス中心街区の開発における技術協力とビルエネルギーマネジメントシステム分野における協力に合意している。その他、三井不動産が投資額 45 億元のエココミュニティ建設を進めている。また、隣接する経済技術開発区に工場をもつトヨタからは、従業員用の住宅 300 戸の予約を得ている。

エコシティ開発側は、企業誘致のための地方税の減免や「国家アニメーション基地」への最新共有設備の導入、エコシティ内における市価 3 分の 1 の公共住宅の整備などを進めている。また、エコシティ側の説明によると、外国企業のプロジェクト参加への最大のインセンティブとしては、「中国国家級のエコシティ建設に参画することにより、自社の技術を中国国内にアピールし、今後中国全土で展開されていくエコシティ建設におけるビジネスにつなげていく」ことにある。日立製作所は、他の日本企業とも提携してプロジェクトに参画しており、同分野の技術に定評のある日本企業が連携しての取り組みに期待しているとの説明であった。

（5）グリーンエネルギー技術等の導入

国内の他の都市と比べ、1 人当たりのエネルギー消費を 20%削減し、再生可能エネルギーの利用率を 20%とすることを目標としている。このため、太陽熱温水システム、太陽光

発電システム、地中熱の熱供給利用システム、冷暖房・発電のガスコージェネレーション（熱電供給）システム、メタンガス発電などを導入するとともに、生活で利用する温水の8割を太陽熱で提供することも目標としている。ただし、風力発電については、風車の一部は完成しているものの現在まで電力系統にはつながっていない。これは中国の電力系統が「中国国家電網」により一元管理されており、その認可を得るのが難しいとの事情によるものである。そもそも当地においては風力発電から得られる電圧は安定しておらず、新技術のアピール的な意味合いが強いとのことであった。

写真5－6　中央管理棟付近の風力発電施設

© 和田智明

ごみ回収については、真空運搬システムを検討しているが、コストが高く、また日本と異なり住民にごみ分別の習慣がないことから、今後の課題は大きいとのことであり、とりあえず60%の回収利用率を目標としているとのことであった。

エコハウスについては、三井不動産が日立製作所やパナソニックの技術を用いて建設を予定している。設備全体ではかなりコスト高となるが、当該土地代が設計当初に比べこの4年間で4倍になっており、コスト上昇を十分に吸収することが出来る状況になったとのことである。

省エネビル建設については、空調及び地熱利用によりエネルギーを30%節約することを目指している。採光などにも工夫をしており、既設の「省エネ管理棟」の建設データは、国家建設部（省）が2010年に省エネビル建設の標準規程を定めた時にも使用された。

雨水・汚水処理については、100%の再利用を目指し、シンガポールからの技術導入により、各家庭への系統を飲料水とそれ以外の生活用水とに分けて2種類とする計画である。海水淡水化も一部導入するがコストが高く、ショールーム的なものにしかならないとのこと。

グリーン交通については、エコシティ内の電気自動車等の利用率を90%とし、残り10%をガソリン自動車と考えている。エコシティ内では次世代路面電車や電気バスを重視し、公共交通の駅から500m以内に住民の90%が暮らすように設計する。また、各家庭においても電気自動車を購入するならば住宅代を下げる等の工夫をする。

以上の新技術の導入・設計にあたっては、中国科学院の約 30 名の専門家によるチームの助言を得ているが、日常的には天津南海大学等の地元機関との協力の方が進めやすく指導を仰いでいる。

全体的に見ると、実行可能な達成目標を掲げて努力しており、現時点では中国国内でのエコシティをリードするポジションを維持しているものと考えられる。今後は如何にコスト評価をしつつ、新技術が導入できるかが成否の分かれ目になっていくものと思われる。

（6）その他

環境配慮型の交通システムの比率をめぐって、中国側とシンガポール側の意見が分かれ、これによりライトレールの建設工事が何度も延期されており、今回の視察時においても今後の計画の明確な説明はなかった。また、エコシティへの企業の進出についても「国家アニメーション基地」以外は、必ずしも活発ではない印象を受けた。エコシティが、単なるベッドタウンとしての不動産開発に終わってしまわないための努力の継続が必要と考えられる。

5. 現地視察（その３～曹妃甸国際生態城）

（1）訪問の概要

①訪問日時：　2012 年 3 月 9 日
②訪問場所：　曹妃甸国際生態城（Caofeitian Eco-city）中央管理センター
③日本側訪問者：

和田智明　東京理科大学特命教授　研究開発戦略センター特任フェロー
伊藤宗太郎　文部科学省科学技術政策研究所総務研究官
馬奈木俊介　東北大学特任教授
青木一彦　科学技術振興機構北京事務所副所長

④中国側対応者：

劉　唐山湾生態城管理委員会経済発展局副局長
魏　唐山湾生態城市工程技術中心主任
田　同副主任

（2）プロジェクトの概要

曹妃甸国際生態城は河北省唐山市の中心部から 80km に位置し、曹妃甸工業区のベッドタウンとして開発が進められている。北京からは約 220km、天津市からは約 80km の距離にある。環渤海湾経済圏の重要地域である唐山湾における臨海都市開発の一環として、開発が進められている。唐山市は石炭を産出する資源型都市であるが、200km に及ぶ海岸線を利用して湿地を埋立て、沿岸型都市を新たに整備しようとする計画である。

建設を推進する大きなインセンティブとなっているのは、

・中国人民の新しい理念へのあこがれ
・コペンハーゲンの COP16 で中国が世界に表明した CO_2 削減目標の達成
・エコタウンのモデルをつくり、中国等の他の都市へその成果を波及させること

であるとしている。

2006 年に当時の胡錦濤国家主席が曹妃甸を訪問し、科学的発展のモデル地域として開発をするよう指示し、以降共産党幹部のほとんどが同地域を視察しており、天津、無錫、深圳と並んで、中国住宅都市農村建設部が推進する 4 つの主要エコシティの一つとなっている。河北省政府及び唐山市は、インフラ整備を中心にすでに約 100 億元を投資しており、今後土地等の売却により回収していくこととしている。総事業費については、今後民間企業がどれだけ立地するかによるため、予測するのが困難とのことであった。

同プロジェクトは唐山湾生態城管理委員会によって運営されており、投資資金は政府による投資と誘致されたサブプロジェクトが主体となっているが、スウェーデン政府も一部支援（汚水処理場の建設、人材育成等）している。

住宅面積は十数%を目標としており、現在は 700－800 世帯、数千人が居住している。今年は第 1 期 3 年目になるが、第 2 期 5 年目に 23 万人が住む町を目指している。

曹妃甸国際生態城の全体計画では、2020 年までに 74.3km^2、2020 年以降に 150km^2 に拡大し、人口も 2020 年までに 80 万人、2020 年以降に 100 万人が居住する都市にしたいとしている。現在は道路、水・電気などのインフラ整備を主に行っており、今後学校、病院、ショッピングセンター、ホテル、娯楽施設などの都市機能を充実させるとしている。さらに 2013 年以降は研究開発センター、金融センターなどのホワイトカラーの雇用を創出する機能を含めたいとしている。

一方で港湾はすでに整備されており、4 つの埠頭、総計 1.5 億トンのバース（船席容量）が完成しており、2015 年には総計 5 億トンのバースになる予定である。

写真 5－7　曹妃甸エコシティの完成予想模型

© 和田智明

（3）環境上の達成目標

スウェーデンの SWECO 社にプロジェクト全体の設計を行い、その際に 7 つの分野（町の機能、グリーン交通、グリーンエネルギー、グリーン建築、水、ゴミ、景観）において総計 141 の技術指標をもうけ、それを達成しようとしている。

再生可能エネルギー開発にかかわる技術指標についてはグリーンエネルギー技術等の導入の項で詳述する。

表 5－1　曹妃甸国際生態城の技術指標の例

指標分類		生態指標体系			
		番号	項目	指標値	単位
系統一 都市機能	住宅	1	都市の人口密度	13000	人／平方キロメートル
		2	総居住面積：あるアリアの総居住面積とエリア内住民数との比率	28.1	m^2／人
	公共施設	3	1 人当たりの公共建築面積	0.5	m^2/ 人
		4	1 人当たりの文化施設面積	0.5	m^2/ 人
		5	1 人当たりの高等教育・研究用地面積	20	m^2/ 人
	ハイリスクエリアに位置する住宅	6	ハイリスクエリアにある住宅割合	0	%
		7	工業汚染エリアにある住宅割合	0	%
		8	海水による氾濫ハイリスクエリアにある住宅割合	0	%

出典：曹妃甸生態城パンフレットより

（4）進出企業等の状況

現在、各国の環境産業を中心に進出を呼びかけている。スウェーデンとは上述したとおり協力が始まっており、SWECO 社との技術提携、汚水処理場への現物出資、マルモ市での 3 年間の人材研修が行われている。また当該地区は歴史的に見て、塩害を解決することが重要であり、オランダの水処理技術が導入されている。

日本とも協力の計画が進行しており、中日エコタウン（4km^2）を建設し、産業団地、住宅を提供する予定になっている。日本設計が全体の設計を行い、エネルギー管理計画（CEMS、BEMS、HEMS 等）はパナソニックが行っている。双日グループの配管製造業者の進出が決定しており、自動車会社等が進出を検討している。

（5）グリーンエネルギー技術の導入等

SWECO 社が最初に技術指標を設定した際は、再生可能エネルギーの利用率 90%以上という目標を立てたが、この数字は 100m^2 程の狭小エリアで再生可能エネルギーの利用が 100%になるというスウェーデンでの実験結果をもとに勘案した数字であり、広大なエリア（約 74km^2）では、現実として達成は難しいと考えている。その後、清華大学の研究グループとも 70%、45%、20%の三つのケースについてインプットとアウトプットの分析を行ったが、75%の場合は風力発電を大規模に導入する必要があり、現在 45%に下げる方向で検討している。

風力発電については、曹妃甸国際生態城の沖合 13km のところに展開する計画で、電力会社（中国国家電網）が建設しグリッドにつなげる予定であったが、経済的な面で採算をとることは難しく、思ったほど進展していない。一方で風力発電は党・中央政府が推進しており、今後どの程度の規模になるかは予測しがたいとのことであった。

太陽光発電については、コストの面から大規模な発電は行わず街灯への利用が主になる。また電池の充電に使い、バス等への利用を考えている。太陽熱利用については、家庭への給湯利用を考えている。家庭への利用については政府からの資金支援制度もある。

地熱利用については、すでに 1000m ほどの深さから 40 ー 50℃の熱水を取り出しそれを利用している。

隣接する産業団地からの余熱利用、特に華潤発電所からの余熱の利用を積極的に進めようとしている。

ゴミ焼却の発電利用の検討も進めており、また汚水・廃水から出るメタンガスの利用も考えている。雨水、汚水の利用率 50%以上、生活ゴミの回収利用率 90%以上、生活ゴミの分別回収率 80%以上を目標に設定している。

さらに、油田はオイルを取り出すと同時に熱水を取り出せるので、その利用（年間約 4 万トン）も検討を進めている。

グリーン交通の導入については、エコシティ内では自転車を主な交通手段にすることを計画しており、グリーン交通 90%以上を目標にしている。200m 四方のブロックで町を作っていくが、交通規制やバス専用道路の導入により「No　Motor 交通」というスローガンの下、電動自転車、電動バスが交通の主体になる予定である。

グリーン建築については、住宅保守基準の 2 つ星（各省住宅建設局が認定、1985 年ベースでエネルギー節約率 60%以上）、3 つ星（中央政府の住宅建設部の認可）を採用することとしており、市の開発政策の中で政府主導の優遇政策をとることとしている。

これらを総括して評価すれば、SWECO 社の最初の技術指標設定、特に再生可能エネルギー利用率の設定にはかなり無理な部分があると考えられる。工程技術中心が技術目標達成には責任を持っているが、政策推進当局が中央政府と協議して最初に掲げた看板を、いかにうまく現実的なラインに軟着陸させるかに苦労している状況と受け取った。

（6）その他

科学教育タウン（曹妃甸科教城）として、17km^2 のエリアに 6 ー 10 の大学、研究施設、居住地区を建設することを計画している。唐山市は、中国の鉄道車両生産基地となっており、現在、西南交通大学大学院がリバプール大学と提携して新しい大学をつくる予定になっている。鉄道関連技術が主体であり、当初は運転員養成のための技術教育を行い、将来は大学院教育も行いたいとしている。また上海市の大学が、外国の大学と提携して新たな大学をつくる動きも進んでいる。

6. 現地視察（その 4 ～重慶・両江新区）

（1）訪問の概要

①訪問日時：　2012 年 3 月 12 日
②訪問場所：　重慶市科学技術委員会
③日本側訪問者：

和田智明　東京理科大学特命教授　研究開発戦略センター特任フェロー
伊藤宗太郎　文部科学省科学技術政策研究所総務研究官
馬奈木俊介　東北大学特任教授

趙晋平　　科学技術振興機構中国センター

④中国側対応者：

肖　　重慶市科学技術委員会国際合作処処長

楊　　重慶市科学技術研究院主任

陳　　重慶市社会発展処処長

(2) プロジェクトの概要

重慶市は人口 2800 万人、面積 8.24 万 km^2 の大きな都市であり、1992 年に長江沿岸開放都市に指定され、1993 年には内陸都市では唯一の国務院に承認された経済技術開発区が設立された。1997 年に北京、上海、天津に次ぐ 4 番目の中央直轄市なった。盆地に立地した都市であり、迅速な経済発展にともない、酸性雨などの環境汚染でも有名な都市である。産業としては、鉄鋼、自動車、化学肥料、機械をはじめとする重化学工業を中心に発展した都市であり、今後自動車産業、車両等の装置産業、IT 産業、医療関連産業、新素材産業、省エネ産業を育成していくことを計画している。

重慶両江新区（Chongqing Liangjiang New Area）は、2010 年 6 月に上海浦東新区、天津濱海新区に次いで､国務院に認可された 3 番目の新区（副省級）として成立した。（両江新区は長江と嘉陵江の交差する区域にある。）2010 年 7 月には、国家発展改革委員会による 6 つの低炭素モデル都市の一つに選定された。

写真 5－8　現在の重慶・両江新区

© 重慶市

重慶両江新区（約 1200km^2）は、内陸部の先進製造業とサービス業の基地と位置づけられており、鉄道車両や新エネルギー車、IT、電力設備、軍需などの工業団地の開発が予定されている。ビジネス区には、国際金融機関などが集積する金融センターを設ける計画である。これらにより同地区の工業総生産を、2020 年までに 6400 億元にしたいとしている（現在は約 800 億元）。人口については現在 200 万人弱であるが、2015 年には 300 万人、2020 年に 400 万人に増やす計画である。

（3）環境上の達成目標等

重慶両江新区のエネルギー政策は、重慶市のエネルギー政策の一部となっている。重慶市のエネルギー消費は、高硫黄・高石灰の石炭が中心である。エネルギー生産量・消費量の増加にともない、温室効果ガスも年々増加している。重慶市の工業は、現在も伝統的な重化学工業を中心としており、製品のためのエネルギー消費と原材料の消費が企業の生産コストの約 75%を占めている。重慶市の単位工業生産額当たりのエネルギー消費は、世界平均水準の 2 ー 3 倍に達し、製品製造のためのエネルギー消費は先進国水準を 40%上回る。2006 年、重慶市の GDP が全国に占める比率は 1.68%であったが、鉱工業・製造業から発生する二酸化硫黄排出量は 3.39%に達し、単位 GDP 当たりの二酸化硫黄排出量は全国平均の倍以上に達した。

重慶市は、全国の都市部・農村部総合改革試験区に位置づけられており、2020 年までに重慶市民の 1 人当たり GDP を 6500 ドル､現在の 4 倍増とする計画が立てられているが、その達成には環境保護のさらなる圧力に直面すると予測している。すなわち、従来の方式により発展を続ければ、温室効果ガスを含めた汚染物の排出量も数倍増になるため、温室効果ガスの排出削減は、重慶市経済社会の持続的発展にとって緊要の課題となっている。

CO_2 の削減目標は、2020 年までに現状より GDP1 万元当たり 1.412 トンの削減としているが、重慶は重工業が中心なので達成には相当な努力を要するとしている。（注：2009 年における中国全体の CO_2 排出量は、GDP1 万元当たり 5.311 トンである。）

（4）進出企業等の状況

重慶市は環境配慮型産業を中心に国外企業、国内企業を積極的に誘致している。

LED については、大連の LED 生産企業がすでに重慶市で操業しており、台湾の LED 企業が工場の建設を進めている。現在、年間売上高 100 億元に達しており、今後さらに増える見通しである

国際的にも、アメリカ、ドイツ、韓国、イギリスと企業との間で企業間協力が進んでおり、日本企業との協力も進もうとしている。

（5）グリーンエネルギー技術等の導入

重慶市は、内陸部における科学技術発展の中核都市として位置づけられており、国の研究機関が 15、市レベルの研究機関が 71 集積している。国家科学技術部の統計では、イノベーションの発展度は全国で 12 位、技術貿易では全国で 5 位、西部地域で 1 位である。新エネルギー、自動車、半導体、移動通信、大型機械の R & D 基地として機能しており、今後も発展していく計画である。

温室効果ガスの排出抑制と気候変動緩和のための技術開発項目としては、以下の R & D 項目に力を入れていくこととしている

・省エネ、高効率エネルギー技術
・新エネルギーおよび再生エネルギーの開発と産業化
・廃棄物の資源化利用技術
・節約型農業技術

なお太陽光発電については、重慶市は日照時間が短いため積極的導入は考えていない。LED については、上述したように年間売上高 100 億元に達しており、今後さらに増える

見通しであるが、重慶市での利用については、今後公共施設においてエネルギー節約型ランプに取り替えていき、将来 LED を採用していきたいと考えている。また、電気自動車の普及を目指しており、現在、路線バスを使ってモデル実証試験をやっている。また両江の水を利用した水ポンプにより、建築エネルギーの節約やクーラーの熱交換への利用も計画している。

このように、重慶市のこれらの技術開発は日本の技術から見て、特に目新しいものはなく、「低炭素都市開発」とは、現実に悪化する環境汚染と CO_2 排出増加を如何に抑制することができるかに全力が傾注されていることであると理解できる。

（6）その他

重慶両江新区では、環境基準に合った企業の誘致を積極的に進めていくこととしており、環境関連産業を増やしていくことに強い意欲を示している。既存の工場で、CO_2 の発生が多い工場を閉鎖したり、改造したりしている。さらに重慶両江新区の中で、CO_2 削減目標を達成できない会社は料金を払い、達成して余裕のある会社はその削減分を売る、いわゆる中国版 CDM[3] を実施することを計画している。現在基準を作っているところであり、今後中央政府と協議を進めていきたいとしている。この制度の目的はエネルギー消費の大きい会社を淘汰することと、CDM を通じて金融商品を増やすことにあるとのことであった。

7. 中国エコシティに関する総括評価

（1）中国エコシティの現状

今回の 4 地点の調査だけで、中国エコシティの全貌が明らかになったわけではない。ただ我が国では、中国にエコシティ（生態城等）が 200 近く存在していることにより、中国のこれらの都市が市民のエコ意識の高まりの下、環境上の配慮を至上目標にして、新エネルギーの導入や CO_2 の発生を抑制する施策を積極的に導入しようとしていると捉える向きがあるが、これは正確ではない。

今回の調査では訪問していないが、NEDO 北京事務所による調査では、低炭素モデル都市に指定されている某都市では、低炭素開発区に低炭素製品交易所、低炭素国際会議場、低炭素研修センターなど低炭素と名前がついているのみで、実質は普通と変わらない建物があるだけとの報告もあり、また、別の生態城ではこれまでの地区開発の看板の上に「生態」というスローガンを追加して貼り付けただけのものもあるとのことであった。

また、今回調査したエコシティでは、エコシティが都市の中心地から離れているため、主要な勤務者は中心地から毎日通う必要があり、輸送の環境負荷の点だけから考えても、エコシティと現時点で実質的に言うことは難しい。

さらにエコシティが成り立っていくためには、住民のエコへの協力が不可欠であるが、住民のエコ意識の醸成のための努力は現時点で十分とはいえず、今後もかなり困難を要するものと考えられる。

[3] CDM とは京都議定書で定められたクリーン開発メカニズムであるが、重慶市の場合は企業間での排出権取引の市場をつくることを CDM と呼んでいる。

（2）中国都市開発の歴史とエコシティのねらい

過去において、国土が広大な中国における新たな発展・改革の多くは、いくつかの先進的なモデルを作り、そこでの成功体験、得られた知識・ノウハウを政府として広く宣伝するとともに、それを全土に広げる形で進められてきた。これは中国では長い社会主義体制の下で保守的な考え方が根強く、最も効果的な時・場所でのモデル事業の展開が、現状維持勢力に対して突破口を開く推進力となることが期待されるからである。具体的には、80 年代における“深圳”での開放改革経済都市の建設､90 年代における“上海･浦東地区”における国際開放都市の建設が成功モデルとして挙げられる。しかしながら、2000 年代に入り全土に多くの“経済技術開発区”が作られた頃から、各種の概念に基づくモデル都市・地域の乱立が目立つようになってきた。

そのような流れの中で、中国のエコシティの現状は、今回の調査でも明らかになったように､産業団地､住宅団地の形成計画の中で､「エコ」という看板の下にグリーンエネルギー技術導入をショーケース的に行い、企業の誘致や住民の定着を図っていくというものである。

（3）エコシティ乱立の背景と今後の予測

第 12 次 5 カ年計画では、第 19 章「主体的機能区戦略の実施」の項目の中で、「最適開発をすすめる都市化した地区については、経済構造、科学技術革新、資源利用、環境保護などの評価を強める。重点的に開発する都市化した地区については､経済成長､産業構造､質・効率、省エネ・排出削減、環境保護及び人口受け入れなどを総合的に評価する」との都市の評価基準が明確に示されており、経済成長が評価の第一項目となっている。

このような党の方針の下で、中国のエコシティが乱立する背景には、天津や重慶のような中央直轄都市では中央の共産党から、唐山市のような都市には省レベルの共産党から市長が実質的に任命されていることが深く関与していると推測される。共産党内の出世競争の中での都市間競争と差別化競争の中で、「低炭素」「エコ」などを看板に掲げて他の都市と差別化し、国や省の支援を獲得することが大きな目的となっている。各市の本音は企業等の投資誘致、工場誘致と雇用の増大による域内 GDP の向上にあり、実質的に「エコ」はそのためのスローガンとして掲げられているのが実態であると考えられる。このように誕生してきたエコシティのため、例えば曹妃甸国際生態城における再生可能エネルギーの利用率のように､一旦設定した技術上の目標を現実的に実行可能な数値に変更することに、現場の技術開発の責任者が施政者との間に立って苦慮するという事態が生じている。これらは、今後他のエコシティでも生じてくる問題であると予測できる。

さらに、このようなエコシティの誕生の経緯を考えると、実際にエコシティに住む住民の間にどれだけ環境保護、温暖化ガス排出抑制の意識が浸透するかは大いに疑問がある。

（4）新技術の導入

一方で、過去の開放改革経済都市や国際解放都市が、モデル都市からスタートし各地に広まった実態を考えると、今回の場合も数箇所の先進的エコシティに導入された先端的技術と技術達成目標が、中国各地の生態城、エコシティに採用されていくことも可能性があるといえる。

新エネルギー開発の面からみれば、中国での国産技術の発展は目覚ましく、2010 年に

は既に、太陽光発電市場においてサンテックパワーを初めとする中国企業が世界の 4 分の 1 以上の生産量で第 1 位を誇り、また風力発電においても世界第 3 位の国内設備容量を達成、世界トップテンの生産企業に 3 社の中国企業が名を連ねている。

エコシティのモデル事業の展開を通して、世界中の企業から吸引された個々の先端技術が、中国の自主技術として吸収されるのに要する時間は、現在の中国の技術力から判断してそれほど長くないと考えられる。

8. 日本の技術導入の可能性

(1) 日本のスマートコミュニティ技術との比較

現在日本では、北九州市、豊田市、横浜市、けいはんな地区で、スマートコミュニティの実証試験が昨年度からスタートしており、各地域で、新エネルギーの導入、電力の効率的管理システムの導入等の実証が展開されつつある。

現在利用されている太陽光、太陽熱、風力について比較した場合、日中間の技術レベルに大差はないと考えられるが、北九州市が導入しようとしている水素エネルギーの実証計画は、製鉄所から発生する水素を家庭用燃料電池に取り込もうという計画であり、安全性の面も含めて、その経済性が実証されれば、日本が優位性をもって保持する技術になる可能性を有している。

また CEMS、BEMS、HEMS 等のエネルギー管理システム、EV、PHV 車と家庭の電力との連結システム（豊田市）、電力料金のダイナミックプライシング（北九州市及び豊田市）などでは、日本の技術レベルが一歩先を行っており、前述の曹妃甸国際生態城の中日エコシティでは、これらの BEMS、HEMS 等の導入が検討されているが、効果的に中国に導入されれば大きな規模に拡大する可能性を十分に有している。

(2) 導入の方策と市場規模

今回の調査対象者との議論では、中国でエコシティとして一番進んでいるのは天津エコシティであり、その後を曹妃甸国際生態城、無錫、深圳等が追いつこうとしているとの感触をもったが、このような先進的エコシティの導入技術に日本が協力していくことは、市場の拡大という点から見れば重要である。具体的には、各地のエコシティの実施主体となっているのは、市政府（官）、開発公司（民）、不動産会社（民）、運営会社（民）であり、これらの者と緊密な連携をとりつつ、今後我が国の技術を売り込む努力を行うことが必要であろう。また、個々の技術の売り込みだけでなく、シンガポール政府等のように計画の初期段階から、エコシティ計画全体に深く関与していくことも、我が国の技術を中国に普及するためには必要な点と考える。

現時点で将来の市場規模については予測不可能であるが、上述したように、ほとんどのエコシティ計画はトップダウン方式で進められており、それらが経済成長を第一義の目的としており、市民サイドのエコ意識が醸成されていない状況では、導入された技術が一つのエコシティ全体に普及することは難しく、限定的な範囲に留まる可能性があることにも留意する必要がある。

9. 参考文献等

NEDO 北京事務所『中国のスマートシティの動向』2011 年
JETRO 北京センター『中国のエコシティ構想の現状と日本企業のビジネスチャンス』2010 年
日経 BP クリーンテック研究所『世界スマートシティ総覧』2011 年
日本総合研究所『中国環境都市』日刊工業新聞社　2010 年
東灘崇明島陳家鎮エココミュニティホームページ
天津エコシティホームページ
曹妃甸エコシティホームページ
重慶両江新区ホームページ

第六章　BGI

文部科学省
ライフサイエンス研究振興分析官
佐　藤　真　輔

1．ゲノム解読の重要性

20 世紀中葉に、さまざまな実験を通じ、遺伝子の本体が DNA であることが分かってきた。特に 1953 年、米国の生化学者 J.D. ワトソン博士と、英国の生物物理学者 F. クリック博士が DNA の二重らせん構造を発表し、いかにしてそれが複製され、子孫に伝わっていくかという基本原理を解明したことにより、分子生物学という新たな分野の幕開けとなった。その後、DNA を構成する 4 種類の塩基（A,G,C,T）からなる配列を決めることにより、タンパク質を形成するアミノ酸の配列が決まり、それによってタンパク質の種類、構造、機能が決まることが明らかとなった。タンパク質は生体を司る最も重要な生体物質であることから、DNA 配列を決定することが、何よりも重要な命題となったのである。

この DNA 配列決定には、まず決定しようとする DNA 断片を制限酵素で切ってプラスミドやバクテリオファージ等のベクターにつなぎ、大腸菌に導入して増殖させ、十分な量の試料を得るという工程が必要であり、さらにその後、化学反応等を行わせてから電気泳動を行い、パターンを調べるという工程が必要で、1970 年代から 1980 年代においては、1 回の解析では数百塩基の読取りがせいぜいだった。

そうした中、ヒトゲノム計画が開始された。それは、ヒトゲノムすなわちヒトの一揃いの染色体（22 本＋ X,Y 染色体：計約 30 億塩基対）の塩基配列を、全部決定するというプロジェクトであった。同計画は米国エネルギー省と厚生省の主導の下、我が国や欧州の国々との国際協力により 1990 年から開始された。計画の開始前には、ゲノム配列を全部解読しても何の意味があるのかとか、膨大なコストや労力に釣り合うだけの成果があるのかとか、生物に対する本来の研究手法ではなくアカデミック的ではないではないかといった、さまざまな批判があった。同計画は技術の進展もあり、開始 15 年後という当初の予定より早く、ゲノムの下書き版（ドラフト）は 2000 年 6 月に、また完成版は 2003 年 4 月に公表された。

ヒトゲノム計画は、DNA 配列を自動で読み取る機器（シーケンサー）の急速な発達をもたらした。20 世紀末から 21 世紀初頭にかけ、第一世代である「蛍光キャピラリーシーケンサー」により多数の生物のゲノムが決定された。2005 年になると、DNA を酵素反応で直接増幅させる PCR 法も用いて、蛍光・発光等を検出して超並列的な塩基配列決定を可能にする次世代シーケンサーが登場した。DNA 解読速度は、ムーアの法則による半導体集積回路の成長に関する速度を上回る、驚異的なスピードで増加してきた。さらに現在、DNA を 1 分子で読み取る第 3 世代シーケンサーも市場化がなされつつある。国際チームによる最初のヒトゲノム解読には数百億円（いろいろな計算方法がある）が投じられ、完成に 10 年以上かかったが、いまや 1 つのヒトゲノムを数日、数千ドルで解読できるようになってきており、個人のゲノムを解読して疾病の予防・診断・治療につなげるオーダーメイド医療の進展が期待されている。

2. 中国のゲノム研究

中国のゲノム研究であるが、科学技術振興機構が 2011 年 6 月に出した「2011 年版のライフサイエンスの分野別国際比較」報告書のうち、ゲノム科学・融合分野の個々の領域のコメントを見ると、次世代につながる技術の開発、新たな研究分野の開発については未だ貧弱である旨の指摘や、独自にシーケンサーを開発する能力はなく、IT 能力も高いわけではないという指摘がなされている。

中国のゲノム研究で知られているのは、かかる個別の研究ではなく、大規模に解読・解析を行うことである。上記報告書では、今回の調査対象となる BGI が世界最大級のゲノムセンターとして注目され、欧米との共同研究体制を組み、豊富な資金力を背景とした大規模研究を実施しており、その中で、様々な人材が育ちノウハウが蓄積されるだろうということも指摘されている。

歴史的に見ると、中国政府はヒトゲノム計画に途中参入し、同計画に参画した唯一の開発途上国となった。そして、その中でヒトゲノムの 1% すなわち 3,000 万塩基対分のゲノム解読を行い、その結果をわずか 2 年の間に完成・発表した。ヒトゲノムの次の計画である HapMap 計画（多数のヒトゲノムを元に、疾病になりやすさ等の体質に関わる遺伝子の位置や変異をゲノム上で特定しようという遺伝子地図づくり）には、中国は米国、英国、カナダ、ナイジェリア、日本とともに当初から参画し、10% 分を担当した。（なお、我が国は同プロジェクトにおいて、中村祐輔博士が率いる理化学研究所遺伝子多型研究センターが全体の 25% の解析を行い、各国の中でも最大の貢献を行った。）

現在、中国は国際ヒトバリオーム計画（HVP）に貢献している。これは各種疾病患者のゲノム解読等により、その原因となる変異を解明しようとするものである。疾病の中には患者数も少ないものも多く、コストパフォーマンスを重視する製薬企業はなかなか手を出したがらない分野であり、国際協力の下で体系的に解明していくことが有効な手段となる。中国は、レアな疾病においても多くの患者を有し、試料収集・提供において優位であることも HVP を主導するに至った一因であると考えられる。中国は HVP 全体のコストの 25% に当たる 3 億ドルを拠出する意向であり、加盟国もオーストラリア、クウェート、マレーシア等、欧米系ではない国々であることから本分野のイニシアチブをとろうとする意図が見てとれる。

3. BGI 視察

BGI は、世界最多の次世代シーケンサーを有し、中国国内や世界各国からゲノム解読作業を受託して、迅速かつ着実な解析を行っている。BGI は、いったいどのようにして生まれ､成長してきたのか。それは世界のゲノミクス､いやライフサイエンスの進展にとっていかなる意味を有するか。はたして今後も発展を続けていくのか。また、BGI は我が国にとっていかなる存在か。我が国はどのような対抗策があるか、あるいはいかなる協力が考えられるか。これらのことを調べるため､我々は BGI の深圳本部と香港支部を訪問し、同機関の幹部や関係者との意見交換及び関連施設の視察を行った。

写真 6－1　BGI 深圳本部の会議室にて
（向かい側中央が楊煥明理事長）

© 佐藤真輔

（1）訪問の概要

①訪問日時：

2012 年 2 月 20 日（月）午前

2012 年 2 月 20 日（月）午後

②訪問場所：

BGI 深圳本部（午前）、BGI 香港支部（午後）

③日本側訪問者：

佐藤真輔	文部科学省	ライフサイエンス研究振興分析官
林崎良英	理化学研究所	横浜研究所オミックス基盤研究領域長
河合　純	理化学研究所	横浜研究所オミックス基盤研究領域副領域長
渡辺泰司	科学技術振興機構	北京事務所長
秦　舟	科学技術振興機構	中国総合研究センター　フェロー

④中国側対応者：

BGI 深圳本部	楊煥明	BGI	理事長
	楊碧澄	BGI	品質宣伝部長
	李春意	BGI	プロジェクトマネージャー
	孫陽	BGI	プロジェクトアシスタント
	林暁琪	BGI	実験室品質管理組
	張婉尼	BGI	実験室経理
	田中雄史	BGI	コンサルタント
	張紅燕	BGI JAPAN	シニアテクニカルディレクター　他

BGI 香港支部　王立志　　BGI 執行総監　他

（2）BGI の沿革

BGI は、北京ゲノム研究所（Beijing Genome Institute）の略称であったが、後述のように本部を深圳に移した段階で、BGI が正式名称となった。BGI は、1999 年 9 月 9 日 9 時 9 分 9 秒に、北京に設置された。設立資金はわずか 100 万人民元だった。この創設時からかかわっていたのが、現在の理事長（President）の楊煥明（Yang Huanming）博士と院長（director）の汪建（Wang Jian）博士である。彼らは BGI 設立に際し、中国政府に働きかけて前述のヒトゲノム計画への途中参入による資金拠出を約束させ、同計画での中国への割り当てとなるヒトゲノムの 1% 分のゲノム解読を BGI で行うこととした。さらに前述の HapMap 計画では、楊理事長がコーディネーターとなり、BGI は中国の担当分である全体の 10% のうち、相当の部分の解析を行った。

BGI は 2002 年 5 月に、Science 誌にイネゲノムの解読（ドラフト）を発表した（スイスの企業である Syngenta 社も成果を同時発表）。BGI はこれを契機に各種動物のゲノムの解読に乗り出し、中国政府にも働きかけ、ニワトリ、カイコ、パンダ等のゲノム解読のため、資金拠出を受けた。さらに BGI は、2003 年 2 月の重症呼吸器症候群（SARS）の発生に対し、当該ウィルスのゲノム解読を行い、さらにそのタンパク質解析を行って最初のウィルス検査キットの開発を行い、臨床に使える診断キットを寄贈した。また、2004 年にスマトラ島沖地震が発生した際には、BGI はチームをタイに派遣し、DNA 解析を用いて身元確認に大いに貢献した。

2003 年末、BGI は民間の機関から中国科学院（CAS）の研究機関となったが、BGI は CAS のガバナンスと相容れず、結局 BGI は CAS を離脱する。CAS の研究機関はアカデミック構造となっているのに対し、BGI は多数のプログラマーやバイオインフォマティシャンを用いて、大量のシーケンシングを組織的に行うスタイルだったことによる。その後、中国の 5 カ年計画（2007 年ー 2011 年）で、BGI にはほとんど国からの拠出が行われる予定がなかったため、BGI は増員しつつあったスタッフを抱え、窮地に陥った。（楊博士によると、中国政府は「シーケンシングの重要性について認識していなかった」とのことである。）

そんな BGI を救ったのが、経済特区にも指定されていた深圳市だった。同市は BGI に対し、4 年間で 2,000 万人民元の資金を拠出し、靴工場の跡地を提供して 2007 年 4 月、BGI 本部を移転させた。この時以来、BGI は北京ゲノミクス研究所というかつての正式名で呼ばれることはなくなり、BGI 自体が正式名称になった。

写真 6－2　BGI 深圳本部の外観

© 佐藤真輔

2008 年 5 月に四川省で大地震が発生した際、BGI は先のスマトラ島沖地震の経験も踏まえ、現地にスタッフの派遣を行った。身元確認の手段としては、ゲノム解析が最適と考えられるようになっていたことによる。また、同年 11 月には、ヒトゲノム解読をアジアで初めて行った。ある漢民族の 2 倍体ゲノム(父親由来と母親由来のゲノム)の解読を行ったのである。ゲノム解読としては、ヒトゲノム計画によるゲノム（いくつかのゲノムの混合物)、セレーラ社によるゲノム（C. ベンター博士のゲノムと言われる)、次世代シーケンサーを用いた初のゲノム（J.D. ワトソン博士のゲノム）に続いて、第 4 番目のゲノム解読として、Nature 誌（Vol. 456, November 6, 2008）に掲載された。イルミナ社が実施したアフリカのヨルバ人のゲノム解読と同時掲載であった。

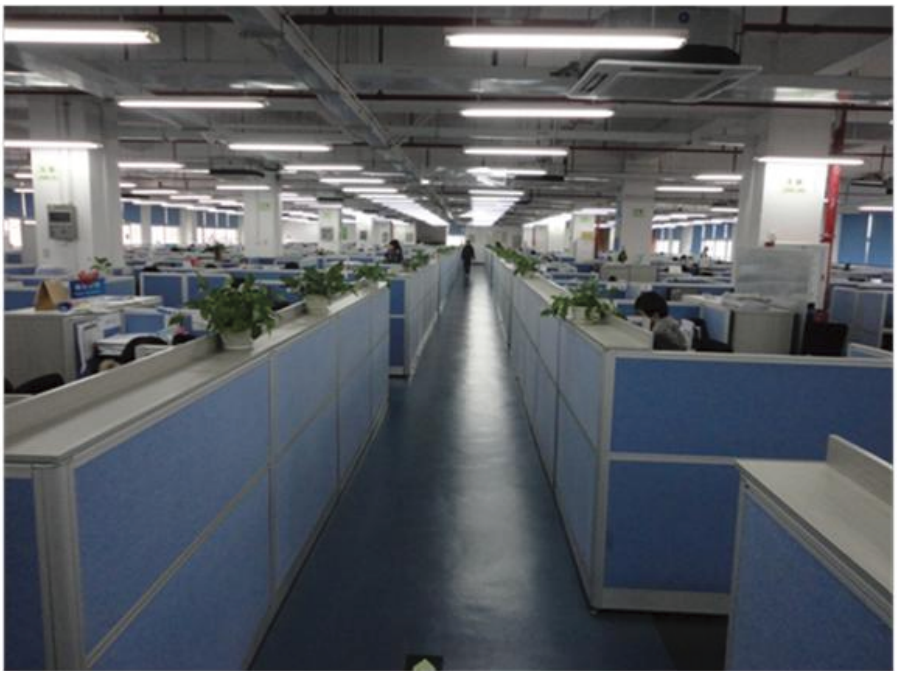
その後、1 つ 1 つのゲノム解読が騒がれる時代が終了し、多数のゲノムを解読して疾病の原因等を解明するプロジェクトが主流となる。BGI は 2008 年より、米国の国立ヒトゲノム研究所および英国のウエルカムトラスト・サンガー研究所とともに、「1,000 人ゲノム計画」すなわち 1,000 人以上のさまざまな人種・民族の遺伝子の特徴を抽出していくというプロジェクトを開始した。（なお残念ながら、日本は本プロジェクトに参画していない。）

2010 年、中国開発銀行が 100 億人民元の信用供与枠（line of credit）を設定、BGI に供与した。BGI はそれを早速､機器購入に充てた。当時､まだ販売が開始したばかりであった、イルミナ社の超高速シークエンサー（ゲノム解析装置）である HiSeq2000 を、128 台も大量購入した。これは BGI の存在を全世界に知らしめた出来事であり、それまでもゲノム解読で名を馳せつつあった BGI のゲノム解読・解析能力をさらに増強させることとなった。

（3）深圳本部の視察

深圳本部は研究者とバイオインフォマティシャンが中心となっており、BGI の頭脳となっている。かなり奥行きの広い見通しのよい部屋に、極めて多数の研究者・技術者がコンピュータ画面と向き合っていた。なお、本部にはこれ以外にプロテオミクスすなわちタンパク質解析のための施設があったのだが、残念ながら見学する時間がとれなかった。

写真 6－3　バイオインフォマティシャンの部屋（BGI 深圳本部）



© 佐藤真輔

写真 6－4　BGI 深圳本部の入り口にて
左から 5 人目から左へ　秦（日）、渡辺（日）、林崎（日）、楊理事長（中）、佐藤（日）、河合（日）

© 佐藤真輔

（4）香港支部の沿革

BGI 香港支部では、香港支部の執行総監（Executive Director）の王立志（Wong Alex）博士と会うことができ、深圳本部と香港支部との役割分担や将来構想等、各種の話を聞くことができた。

香港支部は、印刷工場を改装して、2009 年 3 月に開設した。2012 年 2 月現在、BGI 全体として有している次世代シーケンサーの台数は 164 台（イルミナ社の Hiseq2000 が 137 台、アプライド・バイオシステムズ社の SOLiD4 が 27 台）であるが、Hiseq2000 のうち半数を超える 77 台が、香港支部に置かれている。香港支部では世界各国からゲノム解読の依頼を受け、シーケンサーでそれを読み取り、それをサーバーにストックする役割を持つ。そして、その解析を本部で行った後、その結果を各国に返送するのもまた、香港支部から行う。

一連の作業を香港支部と深圳本部とに分割しているのは、シーケンシング作業と解析作業をそれぞれ専門部署に行わせた方が効率的であること、深圳本部でシーケンシングを行うと中国国内（深圳）に海外から試料を持ち込むための各種手続きが必要となり作業が遅くなることや、委託先の諸外国も中国国内に試料を運ぶことに若干の懸念をもつ場合もあることなどで、これらが軽減される香港に支部を置いているのである。ただ、特にシーケンス作業が困難な試料については、香港支部から深圳本部に持ち込み、専門の研究者がシーケンス作業も含め解析を行っている。

将来的には本部と支部の役割分担が変わっていく可能性がある。海外の顧客にとっては、サーバーやコンピュータは中国本土内ではなく香港に置いていた方がより安心感が高いようであり、国際的なデータは香港に集中させ、国際計測センター、国際物流センター等とする。一方、深圳本部はあくまで国内での発注によるデータを管理させるとともに、人材育成や、保健・医療面への応用を考えていく。

（5）香港支部の視察

香港支部は、まだ 5 階建ての建屋全体の 1 階分しかできておらず、あちこちで工事が行われ、配管は剝き出し、床張りがなされておらず土間になっているところもあった。我々はそのような中、荷物を引き取り、梱包を解く部屋、ゲノムの状態を検査し、それを切断したりする部屋等、シーケンシングの工程を順に見せてもらった。それらの各部屋はコンパクトで、正直、ここがそれほど世界的な施設であるとは思えなかった。

しかし、シーケンサーにかけるための前処理の段階から、にわかに施設は工場の様相を示した。ばらばらに切断した DNA を分注し、解読に十分になるよう酵素増殖を行う（これはイルミナ社のシーケンサーに特有の工程とのこと）のであるが、全く同じ装置が何十台も並んでいた。天井にはそれぞれの機器毎の進展具合を監視するためのカメラが設置され、極めてシスティマティックな様子が見て取れた。

その後通された部屋は、まさに、「シーケンサー工場」だった。HiSeq2000 が居並ぶ姿は、さながら白黒に武装した兵士の如く見えた。大部屋にシーケンサーが 5 列分、各列に Hiseq2000 がそれぞれ十数台ずつ設置され、合計 77 台と、BGI の次世代シーケンサーの半分がここに集中していた。やや意外だったのが、この大きなシーケンサー工場にほとんど人がいなかったことで、各レーンあたりせいぜい 1 人か 2 人の作業者がいるだけだった。いったん試料を装填したら、あとは全て自動化工程になるとのことで、まさしくオートメー

ション工場の様相を呈していた。

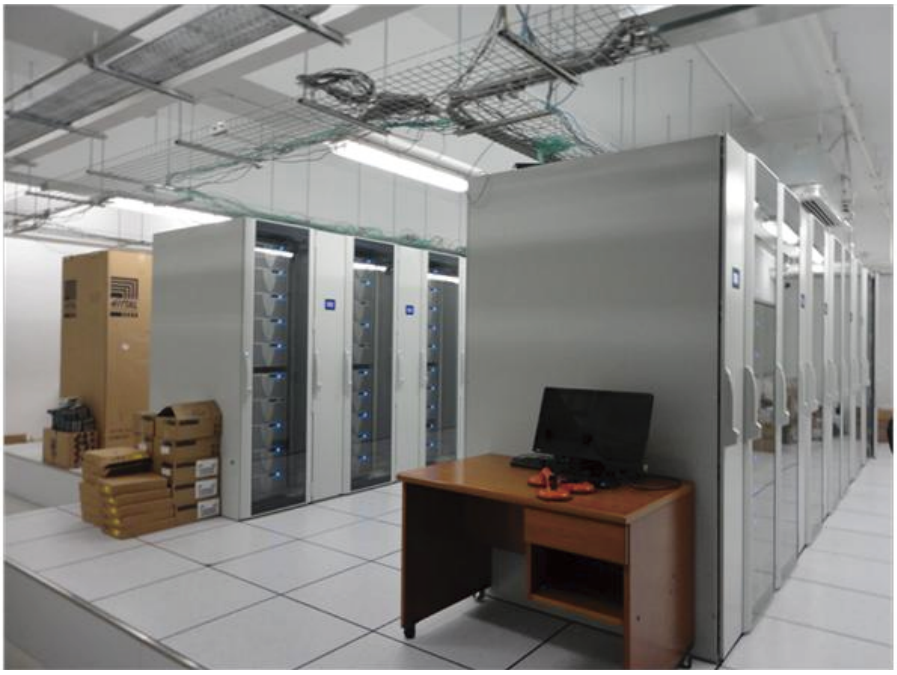
写真 6－5　BGI 香港支部のシーケンサー室

© 佐藤真輔

なお、装置でのトラブルも考えられるため、機器全般の管理のためにイルミナ社の社員が 2 名、常駐しているとのことだった。機器故障の際、たとえば日本では代理店を通して依頼すると時間がかかったり国際便の航空機運賃を含む旅費等を請求されたりすることもあることを考えると、まさしくスケールメリットが生かされていると思われた。

工程の最後となるサーバー室には、多数の大型のサーバーが所狭しと並んでいた。これらのサーバーには、膨大な DNA データが蓄えられている。実際には、シーケンサーで解読された生データは LAN を通じて深圳本部に送られる。本部にはバイオインフォマティシャンを数百名を擁し（前述）、香港支所との間で膨大な情報のやり取りが行われ、送られた生の DNA データ（又はアクセスして）から塩基配列を導くとともに、その解析を行ってその結果をまた LAN を通じて香港支部に戻し、サーバーに蓄えているのである。このため、距離感を全く感じさせず、一体化した対応が図られるようである。

写真 6－6　BGI 香港支部のサーバー室



© 佐藤真輔

香港支部は、こうした一連の作業の結果として得られたゲノム解読・解析データを、発注者に返す。（ただ、インターネットで送信すると膨大な時間がかかってしまい、また、相手方コンピュータにそれだけの容量はないため、返送はディスクで行われる。）

日本支所では土日以外はゲノム解読の発注を受けるが、月曜日に依頼を受けるとその日のうちに香港に試料が送付されて調整され始め、週末に手元に解読・解析結果を届けるのは可能とのこと。

4. BGI の特色

BGI の特色を、文献や今回の深圳本部訪問結果等によりまとめると、次の通りである。

（1）迅速な意志決定

BGI の幹部は、先述の楊理事長、汪院長と、執行院長（Executive Director）の王俊（Wang Jun）博士で、この 3 人が基本方針を決めており、その決断は速い。Science 誌にも、オランダ・カロリンスカ研究所との間で免疫不全に係る原因解明のためのゲノム解読協力の会談の例が紹介されており、その際も楊理事長同席のもと、わずか 2 時間で協力を即断即決し、相手方は“It's BGI speed, the speed of light”と賞賛していたと記されている。

今回の訪問で、BGI の成功の秘訣は何かという質問をしたところ、楊理事長は最新型シーケンサーの機器購入等で、タイミングを見誤らないことであると答えている。

BGI は、その方針決定に資するため、多くの有名人を顧問に置く。二重らせん構造発見者である J.D. ワトソン博士、米国ブロード研（MIT とハーバード大の合同研究所）所長の E. ランダー博士、最初の直接ゲノム決定法を開発した J. チャーチ博士、器官発生とプログラム細胞死研究でノーベル生理学医学賞を受賞した J. サルストン博士など、著名

な研究者が並ぶ。これら重鎮の的確なアドバイスを得ることの意義は当然であるが、それ以上に、彼らを顧問に据えていることで、BGI の国際的信用性は大いに高まったといえる。

（2）膨大な若手スタッフ

BGI の特徴は、多くの人員を雇用して大量かつ組織的に解読を行うことである。今回の訪問で確認したところ、スタッフ数は合計約 3,500 名、うち研究者は約 700 人、バイオインフォマティシャン約 450 人、テクニシャンは 1,000 人弱とのことであった。フランスのパスツール研は 2,700 人、日本の理化学研究所には 3,300 人のスタッフがいる。だが、BGI がこれらと本質的に違うのは、研究所内のほとんど全ての業務が、ライフサイエンス、しかもゲノム解読・解析を共通ドグマとしていることである。ゲノム解読・解析を中心に行っている英国ウェルカム・トラストのサンガー研究所で 900 人、米国 NIH の国立ヒトゲノム研究所で 100 人に満たない。日本の産業総合研究所の臨海副都心センターは、日本でも最も多数のバイオインフォマティシャンが集積しているが、やはりスタッフ数は 100 名に満たないと思われる。

また、スタッフの年齢が 25 ー 26 歳と極端に若い。かつて Nature 誌（Vol.464, March 4, 2010）に大きく記事が掲載されたときも、若さというのが一つの着眼点だった。大学卒業直後、又は高校卒業で採用しているともいわれている。BGI は、即戦力としてではなく大卒者（又は高卒者）を採用し、その後教育訓練を自ら行っているのである。研修システムは完備されており、たとえばバイオインフォマティシャンの場合、最初の 3 ヶ月でみっちりトレーニングを行い、基本的ノウハウをほぼ完璧にマスターできるようになっている。現在力を入れているのは、大学の設立である。これは、BGI 自らが主体的に行おうとしており、2011 年に承認を受け、深圳市内で建設計画が進んでいる。

給与は他の中国系の企業と同程度かそれよりよい。ただし､外資系には少し劣るようで、噂によると、役員秘書の給与で年収 6,000 ドルとのことである。内部での競争は結構厳しく、実績に応じ昇給やボーナス等が考慮されている。若手に対するケアはよい。出勤時間も厳密には決められておらず、タイムカードなども存在しない。部活動もバドミントン、バスケット、ハイキング等さまざまで、かなりの者がいずれかの活動に所属している。独身者はほぼ全員が敷地内にある寮に入っているが、妻帯者は近くに住み社員バスで通っている。学生生活のような雰囲気があるとのことである。

（3）最近の業務状況

最近では、フィリピンの国際イネ研究所（IRRI）との提携で、3,000 種ものイネのゲノム解読を行っている。また 2011 年初め、5,000 種ものキャッサバのゲノム解読を行うことを発表した。その他、このような大規模ゲノム解読として、1,000 動植物プロジェクト、1,000 微生物ゲノムプロジェクト、1,000 植物 de novo トランスクリプトームプロジェクト等が動いている。これらは世界各国との連携で取り組むものであるが、まさに BGI の本領が発揮され、他機関の追随を許さない効率的･迅速な解析が行われていると思われる。

BGI の業務は、あくまでゲノム解読・解析が主流であるが、それにとどまらず、他分野へも活動を広げようとしている。まず、RNA 解析やエピジェネティック解析等である。これらは次世代シーケンサーを用いることで解析可能であり、装置の有効利用を図るものである。また、タンパク質の解析業務にも乗り出している。実際、深圳本部には多数のバ

イオインフォマティシャンとともに、タンパク質解析のための一角があり、質量分析計等を用いてプロテオームの状況を調べたり、個々のタンパク質の同定を行ったりしている。これら、各種のオミックスを用いることにより、細胞内の状況やシステムがより深く解明できることとなるが、同時に、関与するBGI研究者・技術者は関連する各種装置の用い方をマスターできるわけである。

（4）広報・販売活動

BGIは民間の機関であり、深圳政府や中国開発銀行への巨額の負債があって、これを返済するため、たえずゲノム解読・解析業務の受託や研究グラントの獲得に努めなければならないという宿命を持つ。このため宣伝・広報活動にも熱心である。

その一環として、BGIは、世界各国に次々と支所を開設している。BGIは、デンマークのコペンハーゲン、米国のボストンに続き、2011年9月、我が国の神戸医療産業都市内に、海外では3カ所目の拠点として、日本支部BGI JAPANを開設した。同産業都市内はスパコン「京」をはじめ多数の研究機関、医療機関、企業等が集積しており、より多くの委託が行われるとともに、業務の効率化が図られるものとBGIは期待している。BGIは現在、南ヨーロッパやオーストラリア等にも支部を作ろうとしている。需要のあるところに近接して設置することにより、ゲノム解読をより早く、より安価に提供することが可能になるのである。

さらにBGIは、クラウドコンピューティングサービスも開始した。BGIは102テラFLOPSのピーク計算速度、20テラBのメモリ容量、10ペタBのストレージを誇るスーパーコンピューティングセンターを複数保有しているが、顧客はBGIに自身のゲノム情報を預け、これらのコンピュータでの各種の解析ソフトを、まるで自分のコンピュータ上で扱っているかのように用いることができるようにしたのである。

（5）社会貢献

BGIは先述のように、SARSウィルスの解読、スマトラ沖大震災や四川州大震災の際の身元判明等、社会にとって役立つようなものにも積極的な活動を行ってきた。

その一環として、2010年5月、王院長を含む登山隊はエベレストに登坂、その頂上に到着し、同年開催の上海万博の旗を掲げた。なお同登山隊は登山中、標高に応じ血液や微生物の試料採取も行っており、今後の微生物のゲノム解読にいかす予定である。また、BGIは､2011年には欧州内で流行したドイツの大腸菌O-104のゲノム解読をいち早く行った。

このような数々の社会貢献によりBGIは国内外から賞賛を浴び、それは同時にBGIの宣伝ともなり、ますます各国からの委託や国際協力が進むよい流れを導いている。

5. BGIの成功要因

BGIは近年、世界のゲノム解読センターの名をほしいままにし、どんどん資金、人材、情報を集めている。現在のところ成功だと言ってよいだろう。それでは、かかる成功の原因は何だったのか。日本の専門家の意見も踏まえ、以下に分析する。

（1）大量ゲノム解読・解析に着目・特化させたこと

1つは、ライフサイエンスの研究方法の変化やシーケンサーの重要性を早くから見抜き、特にシーケンシングとバイオインフォマティクスに焦点を絞ってずっと変わらず活動を続けてきたことだろう。BGI設立当時は、世界ではたった1つのヒトゲノム解読に汲々としており、大量に、しかも個人毎のゲノムが解読される時代がこれほど早く到来することになるとはほとんど予測されていなかった。

それは最初のヒトゲノムの解読後においても言える。我が国の場合、ヒトゲノム解読が終了した後、国はゲノム解読そのものを主目的とするのはやめ、タンパク質等他のものに視点を移していったため、ゲノム解読への力の入れ方が少し弱くなってしまった観がある。それに対し、ゲノム解読・解析技術の進展や需要の広がりを見込んで一点集中させ、しかもその視点を揺るがさなかったBGIのやり方は見事だったといえる。

（2）機器購入のタイミングが適切だったこと

BGIは、先述のようにHiseq2000を128台も大量購入したわけであるが、そのタイミングを見極めるのは実に難しい。楊博士は前述のように、そのような機器購入の見極めこそBGIの企業戦略の真骨頂であると語った。

実際、同購入を行った当時、次世代シーケンサーは3社（イルミナ社、ライフテクノロジーズ社、ロッシュ・ダイアグノスティクス社）が競合し、1年にほぼ2回のハイペースでそれぞれの主力製品のリニューアルを行い、先述のようにDNA解読速度は驚異的なスピードで増加してきていた。パソコン購入等でもよく経験することだが、せっかくシーケンサーを買っても、すぐ次にそれよりさらに上回る機器が登場すると、とたんに陳腐化してしまう。

だが、BGIの見極めは的確だった。次世代型としてはこれ以上の性能向上は難しいと認識したのか、HiSeq2000の登場を最後に、3社によるいわゆる次世代シーケンサーの開発競争はやや一段落し、各社とも、小型で安価、かつユーザーフレンドリーの卓上型シーケンサーにベクトルを移しつつある。さらに次の世代、パシフィック・バイオサイエンシーズ社の1分子リアルタイム（SMRT）シーケンサーや、オクスフォード・ナノポアテクノロジーズ社のナノポア法によるシーケンサーも次第に製品化されつつあるが、まだ精度の悪さはなかなか改善されていないようだ。

このように勝ち負けもはっきりしてきた中で、2012年現在の業界標準であるHiseq2000の卓越性を見抜いた眼力は見事なものである。

（3）集積による効果

大きいのは、集積による効果である。人でも物でもそうだが、集積させることにより、スケールメリットを生かし、極めて効果的・効率的にことを運んでいる。

先のHiseq2000の大量購入は、当然大きな割引対象になっていただろうし、これだけの機器を購入しているからこそ、イルミナ社のスタッフが常駐し、故障等に極めて迅速に対応できようになっているのである。また、人が集積することの効果も大きい。研修等をシスティマティックに行えるし、所内で多数のスタッフが議論する中でノウハウが蓄積されるというメリットがある。

（4）若手を惹きつけてきたこと

一般に日本の研究室では、独自の実験系や手法に頼り、学生は限られたノウハウしか身につけることしかできない。だから、その後研究者として独り立ちできるよう、若手研究者はポスドクとしていろいろな所に武者修行に行くのである。中国では特に、随所で階層構造（ヒエラルキー）が顔を出し､大学では教授の命令は絶対的なものと考えられている。その中で学生やポスドクは特定の、型にはまった研究しかできず、なかなか創造力が身につかないという実態もある。

そのような若手研究者から見れば、ゲノム解読に関する 1 から 10 までが、そこにいるだけで身につく BGI のシステムは､魅力的に映るに違いない。また､BGI では単なるシーケンシング技術だけでなく、まさに大学でのような意見交換・情報交換等を通じ、高度な知見やものの考え方が取得できる。さらに、ゲノム解読を行い、論文を投稿する場合、PI をはじめ解読に携わった主たる研究者・技術者は名前を当該論文に掲載される。それがまた彼らにとって良い刺激となり､また実績となるのである｡かかる若者のインセンティブをかきたてる BGI のやり方は見事という他ない。

だからこそ、極めて優秀な若手が、安い給料にもかかわらず BGI に集まり、大きな成果を挙げてきた。また訪問時に、皆、とても誠実・忠実（so loyal）であることが強調されていた。

（5）世界の注目を集める上手な広報活動を行ったこと

BGI が解読したイネゲノム、アジア人初のゲノム、パンダのゲノム、蚕のゲノム等は、いずれも特徴があり、世界の注目を浴びた。そのような条件設定は極めて上手だったと考えられる。同じ手間をかけてゲノム解読を行っても、注目されないものであれば宣伝効果はない。

また、BGI が行った災害やパンデミックに際しての貢献は、BGI のイメージアップに大いに役立ったと考えられる。

さらに、国際会議を主催したり、世界各地でシンポジウムを開催したり、学会等でセミナーを開催することにより、BGI の名を関係者に印象づけることに成功している。日本においても、日本癌学会、日本分子生物学会、日本生化学会等で BGI はセミナーを開催している。

6. BGI に対する批判

しかし、日本の学術界を中心とした専門家からは、BGI に対して否定的、批判的な意見が多く聞こえてくることも事実である。ここでは、その主なものを取り上げ、これに対して若干の考察を試みることとする。

（1）BGI は工場であって創造性がない

最大の批判は､BGI は単なるゲノム解読を定型的に行う工場であって､研究所ではない､すなわち彼らには創造性がないというものである。

ライフサイエンスの伝統的な研究手法は、次のようなものである。まず研究者は、興味深いと考える現象に着目する。そして、細胞の中で何が起こっているのか、想像力を巡ら

せる。標的の物質やメカニズムに当たりをつけ、それをつり出せるような特定の系を考え、条件設定を変えた実験を何度も行うことによって、次第に目的物を純化していき、最後はそれに関わる分子等を特定する。それからその DNA 配列やタンパク質の立体構造を決めていき、一連の現象における意味合いを理解するのである。これはまさに、分子生物学研究の王道であるが、研究者個人の才覚が大きく影響する、職人芸的な手法によるものである。このような伝統的な分子生物学的手法をとってきた、特に理学系の研究者にとってみれば、意味なく全てを解読・解析するのは邪道であるとする見方は確かにある。

しかし、次世代シーケンサーによるゲノム解読は、こうした手法を一変させた。ブルドーザーよろしく、そこにある遺伝子を全て読みこんでしまうのである。釣りに例えると、今までの手法が、大海の中で大物を狙って一本釣りをするものであるとすれば、新たな手法は底引き網とかトロール漁法、すなわち一網打尽にするものといった例えが適切である。その中から大物をすぐに見つけられるか否か分からないが、そうして解読したものの中に目的とした遺伝子が混ざっているのは間違いなく、あとは網を小さくしていきさえすればよいのである。

こうしたやり方が果たして真に学問であり、研究であるのか。実はこのような議論は、ヒトゲノム計画の開始に際して起きたものである。それは世界だけでなく、日本の中でも起こり、膨大なお金をかけてゲノムを全部解読しても、その遺伝子の意味が分からなければそもそも意味がないではないかと主張する研究者も多かった。ただ、先述したとおり、技術の進展により、安価で迅速にデータが得られるような時代が到来したからには、それを研究に利用するのは極めて当然のことであり、まず情報を全て手元に置いてから、次第に絞り上げていけばよく、それは１つの研究スタイルであろう。

また、後述するが、BGI は各国との協力の下、ゲノム解読は全面的に請け負うが、それと同時に共同で解析業務を行っている。したがって現在でも単なる工場ではなく、また将来的にも、分析などの研究に直結するノウハウが蓄積されることは間違いない。

（2）BGI は自らシーケンサーの開発はしていない

BGI を単なる工場だとする意見に関連して、BGI はシーケンサーを購入するだけで自らは全く開発していないことも批判の対象となっている。

この点について、今回楊理事長に見解を求めたところ、シーケンスは航空機と同じであると回答している。すなわち、開発にはずいぶんお金がかかるので、中国は航空機を自らは作らない。その代わり、米国や欧州から、大量に安く航空機を買い込み、それによって多くの人々を運び、中国に世界の人々を惹きつけている。それと同様、新たな機器開発を行うことは、現在の BGI の役割ではなく、むしろ、他所で開発された機器を見極めて多く購入し、それを用いて多くのゲノム解読を行うことに意義がある。だから、日本がもしよい機器を開発すれば、BGI はそれを買う。このような考え方であるとのことであった。

シーケンシングそのもののための新しい機器開発や手法開発をしないという考え方は、開き直っているように見えるが、効率を考えると大いに頷けるものである。シーケンサーは主として民間企業が中心となって開発を行っており、開発競争は極限まで進んだ形になっている。需要の方もそろそろマックスに至りそうで、市場はせいぜい数十億ー数百億円だと思われる。これでは開発すべきインセンティブも見られないだろう。このような状況の中で、一からの技術開発競争に参入するのは採算を考えた場合無謀であり、むしろシー

ケンシングと付帯解析に特化するのが賢明な選択といえる。

（3）丁寧な解析においてBGIは劣る

BGIは安さや迅速さで突出するものの、丁寧な解析において劣るという指摘がある。BGIのゲノム解読すなわち塩基配列決定は雑であり、精度が悪いというものである。

これは誤解と考えられる。次世代シーケンサーは、当初、精度の悪さが問題となっていた。たとえば疾病の原因を探る時は、たった1つの塩基の変異に帰着する場合がある。だから、仮に精度が99.999%正確であったとしても、残り0.001%が不正確だとするならば、30億塩基だと3万塩基が誤りということになり、この中から真の疾病の原因変異を見出していくのは容易ではない。だから、実際には一から何十回も繰り返して解読し、それらを比較しあうことで最も確実だと思われる配列を決定しているわけである。

だが、シーケンサーの進展とともに進化したのはゲノム解読のスピードや安さだけではない。その精度も飛躍的に向上した。BGIが多く導入したHiSecq2000は、その最たるものである。本機種を凌駕するものは、今のところ出ていない状況にある。BGIでは、そのような最新型の高精度の機器を用いていることに加え、若手に十分な研修時間を設け、解読の精度を増加させる努力に余念はなく、その点での批判は間違いだと思われる。

（4）アフターケアが劣る

BGIは解析が安い分、発注者の立場に立った丁寧なケアが劣るという批判がある。特に、顧客を第一に考える日本流のビジネスからするとそのような批判が出るのは頷けるが、実際には、BGIは顧客の立場に立ち多くの支所を世界に展開しており、日本でも神戸に日本支所（BGI JAPAN）を開設し、日本語のできるスタッフも取りそろえている。BGI深圳本部では、製造ラインに日本企業の流れ作業方式を導入すべく、ホンダ中国工場から2人の日本人を技術アドバイザーとして雇い入れているが、おそらくBGIは日本流の商売方法も学び、それを取り入れようとしていると思われる。

（5）高度な解析においてBGIは劣る

ゲノム解読のみではなく、それを用いた解析、すなわちエクソン・イントロン、遺伝子注釈（アノテーション）、さらにそれから生じるタンパク質の立体構造予測や機能予測等、一層高度な解析になると、BGIは劣るだろうという意見もある。

現時点では、これは事実であると考えられる。最先端の研究現場で培われた、高度な解析のノウハウは、ただちには真似ができない部分が多い。

だが、BGIの研究者及びバイオインフォマティシャンは、既述のように、それぞれ計700人及び450人もいる。これだけの数の関係者が、大学の研究室のようなオープンな環境で、毎日切磋琢磨しながらその能力に磨きをかけている。また共同研究などにより、世界から情報が集まり、いろいろな解析手法のノウハウも集まってくる。将来的には、飛躍的にポテンシャルを高めることも十分に想定しておく必要がある。

（6）個人情報の保護等、倫理的問題がある

Nature誌の論説（Vol.464, March 4, 2010）においては、若手研究者・技術者に対し、データ標準の維持や個人情報の保護等、倫理的問題等で十分な教育がなされていないのではと

の懸念が指摘されている。

今回はこの件について議論は無かった。しかし、訪問で見た感じでは、多くの研究者・技術者が極めて組織的・体制的に動き、教育がしっかりなされている雰囲気であり、そのような心配はなさそうにも思われる。特に、BGI はゲノム解読で商売をしようとしているからには、個人情報等に鈍感であるはずはないと思われるが、今後の再調査の対象であろう。

7. 今後の課題と対応

（1）業務の効率化

3,500 名ものスタッフの人件費に加え、シーケンサー購入等でいまだに巨額のローンが残っており、政府からのグラント取得や各国からのゲノム解析・解読の受託で走り続けていかねばならない。

おそらく、今後 BGI に対抗できるような同種の機関は現れないし、たとえ現れても価格競争には打ち勝っていくだろう。ただ、最近の企業のシーケンサー開発の方向として、従来のような性能アップを求める方向から、ユーザフレンドリー化、安価化、小型化にも舵を向けており、ある程度大きな研究所でかかる小型機器を導入し、自前で解読を行うようになると、今後需要がどうなるか分からない。

BGI は、今後一層の業務の効率化とスピードアップを図る必要がある。効率化の一環として、前述のように日本の優れた自動車生産システムをシーケンサーの流れ作業に取り入れていこうとしている。また、BGI は最近、NVIDIA 社製の GPU（グラフィックス・アクセラレータ）を有するスパコンを導入し、これにより、シーケンサーに流した後の塩基配列決定のスピードを 4 日間から 6 時間に大幅に短縮させている。

さらに、ゲノム解読・解析の市場にとどまらず、培ったノウハウをいかして他の分野に進出することも今後のベクトルとして考えられる。その意味で、先述の RNA、エピゲノム、さらにプロテオミクスの解読・解析の事業もスタートさせ、そして、クラウドコンピューティングサービスも開始したことは、業務の拡大の上で意味をもつだろう。ただし、拡充された業務の大部分は従来のシーケンサーやサーバーを用いることができるため、ほとんど余分な投資はかからないが、プロテオミクスに関しては、新たな機器購入やノウハウの導入が必要であり、BGI の今後を占うための試金石となるかもしれない。

（2）ゲノム解読に関わる需要の拡大

顧客を増やすだけでなく、この世界のフロントランナーとして、ゲノム解読そのものの需要を開発したり、それを行う人材の育成を行うことで、本分野自体の繁栄にも貢献していく必要がある。

その意味で、BGI は 2011 年 11 月、英国の雑誌 BioMed Central 誌と共同で、生命・生物医学分野を対象とした Giga Science というオープンアクセスジャーナルを創刊した。同誌の特徴は、従来の形式の論文とデータセットを併せて公開することにある。

また、先述のように、BGI は独自にゲノム関連に特化した大学を設立しようとしている。企業と提携した学校の設立は、日本のトヨタ等の例はみられるが、BGI のような新興企

業の例は極めて珍しいと思われる。詳細は不明だが、そこでゲノミクスに必要な各種の技術を学ばせることで、将来の BGI を支える人材を確保しようというのがその趣旨でもあろう。

8. 日本のとるべき方策

それでは、かかる BGI に対し、日本はいかなる方策をとるべきか。競争か、協力か。以下、論を進めたい。

（1）日本における BGI 的な大規模施設設置によるビジネスの可能性

日本にも BGI のような一極集中型でシーケンサーを大量整備し、組織的に解析することが可能かどうか。

BGI は深圳政府から安く工場跡地を払い下げてもらい、また、シーケンサーの大量購入で、実質的には相当、値引きをさせたと思われる。さらに深圳本部と香港支部とをシスティマティックに連携させ、効率を極限まで切り詰めている。さらに、優秀な若手人材を採用しており、平均年齢も若く、人件費は非常に安くなっている。日本なら、人件費に相当なお金がかかり、BGI と同程度の価格でゲノム解読を行おうとするならば、全く儲けが期待できないか、もしくは赤字になるものと考えられる。従来のゲノム解読・解析のやり方で、BGI にビジネスとして対抗するのは、日本では困難であると考えられる。

（2）日本国内で、シーケンサーの集中は必要か

BGI のように、日本国内の一カ所に、シーケンサー解読業務を集中させるメリットはあるだろうか。ちなみに、現在日本で最多の次世代シーケンサーを擁するのは理化学研究所横浜研究所であるが、それとても 16 台であり、BGI に比べると 10 分の 1 にすぎない。

1 機関で 1 台のみ保有している場合、故障すると修理を依頼しなければならず、時間的なロスが大きい。多数の機器を保有していれば、たとえ 1 つの機器が壊れたとしても、他の機器で代替可能で、ロスはない。ゲノム解読･解析が定型的な作業になりつつある現在、個々の研究室でのそのための人材を揃えたり管理を行ったりする手間のことを考えれば、ある程度シーケンサーをいくつかの機関に集中させることはメリットがあると考えられる。

だが、その場合は BGI に委託する以上のメリットが必要である。たとえば非常に研究的価値があって国外と激しく競争しているテーマであり BGI にも情報を提供したくないものであるとか、又は極めて迅速に結果を得ないといけないもの等の条件を付ける必要があろう。

一方、そのようにシーケンサーを集中させた場合、バイオインフォマティシャンをどこまで集中させ、また、解析はどこまで行うかという問題がある。ある程度シーケンサーを集中化させることは必要であるにしても､個別の解析は､基本的にはバイオインフォマティシャンが生物系の研究者と一緒になって行うのが筋である。それぞれの大学や研究所にはそれぞれの伝統に基づく機関･研究室のノウハウが存在し、そこに研究者が集まっている。それを考えると､たとえ集中化を行っても､解析以降は各機関にバイオインフォマティシャンが存在していることが必要だろう。

（3）日本は BGI の顧客となるべきか

筆者は、日本の研究機関は、BGI の顧客となるべきであると考えている。もちろん、研究競争を行っているものなど、例外はある。BGI も、主に日本を顧客として考えており、神戸に日本支所を設置したのは、販売戦略が主目的である。

日本としては、少しでも安く発注をし、効果的・効率的にゲノム解読・解析を行わせることだろう。今回の訪問で、BGI に一括発注による低価格化の可能性を問うたところ、我が国の取りまとめ機関と BGI との間の MOU 締結の必要性を指摘された。

また、お金を払って単純労働をさせるという考えだけでなく、日本の研究開発にとって、メリットがあるようにすべきである。欧米が行っているような、BGI との研究協力の方式をとる必要があるかもしれない。具体的には、ある特定のテーマについて方針を立て、BGI に解読を行ってもらう。必要ならば自分たちがほしい解析もやってもらうというオプションもあり得る。そうした上で、その結果を用いてゲノム上での意味を読み取る。たとえば疾病ならば適切な診断マーカー、治療マーカーの特定とか、進化遺伝学ならば分岐点及び分岐を特徴づける遺伝子の特定とか。この場合、BGI はそのために必要なデータを整理し、提供してくれる有用な秘書となる。何も最初から最後まで自分で行う必要はなく、定型的な作業はできるところに任せればよいのである。しかも、自分でやるよりはるかに速く、また安くできるのである。BGI JAPAN 社長の劉氏も「日本は生物科学の研究が世界最高水準であるため、日本に拠点を設立することにより、日本の研究者との共同研究の拡大、及びサービス提供先の拡大を目指す。」と述べており、BGI も顧客としてという観点とともに、我が国との研究協力による知見の増大に期待している面もあると考えられる。

（4）新たなタイプのシーケンサーの共同開発

BGI は、ハードの機器開発は行わない方針である。一方日本は、第 3 世代までの高速シーケンサー開発で敗北している。しかし、その次に位置する新たなシーケンサー開発で日本は BGI と共同開発が可能と考えられる。

現在、理化学研究所横浜研究所が行っている 1 分子 DNA シーケンサー（1 細胞シーケンサー）の開発は、世界的にみてもユニークなものである。1 つの細胞内にある 1 分子の DNA から塩基配列を解読する技術の開発で、今までのものと手法は全く異なる。すなわち、これまでのシーケンサーでは、ゲノム解読を行う場合、多数の細胞から取った多数の混ざり物の DNA を解読していた。一細胞シーケンサーでは、1 つの細胞の中の、混じりっけない 1 つの DNA 分子をそのまま解読しようとしているのである。

このようなシーケンサーを、日本のハード技術や解析技術、BGI の効率的、高速度の読み取り技術を組み合わせ、共同開発を行う可能性があるのではないかと考えている。

9. 所感

今回の調査を通じ、BGI がこれまで極めて優れた着眼点の下、洞察力と決断力をもって現在の位置を築いてきたことが分かった。また、現在も、巨額な借金を抱えはしているが、それなりの方策は持ち合わせており、自由闊達な環境の中、カリスマ指導者と若手の

スタッフ達が連携して新たな分野を切りひらいていこうとする清廉さが見てとれた。

いずれにせよ、BGI における試みは、今後のライフサイエンス・ゲノムサイエンスの進むべき道を占う上で、研究者・技術者のキャリアパスも含め、引き続き注視していく必要があるだろう。

本調査において、BGI 深圳本部には理化学研究所横浜研究所オミックス基盤研究領域長の林崎良英博士に同行していただいたが、同博士が同研究所のフェロー（アドバイザー）をされ、昔から楊理事長と旧知の関係であったことから、幸運にも超多忙な同理事長に接見することができた。（楊理事長らは BGI の創設に際し参考にするため、理化学研究所に調査に訪れたことがあり、いまだに同研究所を“Big Plaza”と呼んでいるとのこと。）

また、同博士及び東京大学先端科学技術研究センター教授の油谷浩幸博士には報告書の作成において貴重なコメントをいただいた。併せて感謝の意を表したい。

10. 参考文献等

D. Cyranoski, The Sequence Factory, Nature, 464, 22-24 (2010)
D. Normile, China's Sequencing Powerhouse Comes of Age, Science, 335, 516-519 (2012)
BGI ホームページ

第七章　iPS 細胞研究

科学技術振興機構　北京事務所　所長
渡　辺　泰　司

1. 世界の iPS 細胞研究

2006 年に京都大学の山中伸弥教授が、4 つの遺伝子（転写因子）を発現させることで体細胞を多能性幹細胞に誘導できる画期的な方法を発表して以来、iPS 細胞は生命の源である人の胚を滅して作成する ES 細胞のような倫理問題がなく、患者自身の細胞を使った再生医療にも繋がる技術として、世界中で研究開発が進められている。

究極的には、個人の体細胞を使って細胞を多能性のある幹細胞（iPS 細胞）に誘導（初期化）し、その細胞を使って個人の遺伝子と同じ心臓や眼、血液といった細胞、組織、臓器（「組織等」という。）に変化（分化誘導）させ、病気の組織等を代替する再生医療として活用できる技術であり、①細胞の初期化、②細胞の分化誘導、③移植・再生医療への応用に向けた研究が進められている。また iPS 細胞は、ヒトの胚から作られる ES 細胞等の他の幹細胞に比べ、初期化の効率が低いことや、ガン化する割合が高い等の問題も指摘されており、期待される臨床応用に対して乗り越えるべき重要な課題となっている。このため、社会科学的な面を含めた、④安全確保のためのレギュレーション（安全基準、ガイドライン等）、⑤知財権の確保、⑥細胞供給システム（細胞バンク等）も、再生医療の普及に当たって重要な要素となっている。

2. 中国の iPS 細胞研究

2006 年の山中伸弥教授の論文発表を受け、中国においても iPS 細胞研究は大変注目され、多くの研究者が関心を持って研究を進め、非常に早い段階から関連する研究成果を挙げている。

中国においては、幹細胞に関する研究で長い歴史を有しており、発生学者の童第周（Dr. Dizhou Tong）（中国科学院院士）が 1963 年に世界で初めてクローン魚（フナ）を作成することに成功して以来、中国科学院（以下「CAS」と呼ぶ。）や中国農業大学等において、大型家畜（牛、羊等）のクローン作製等の伝統的な発生学等の研究が継続されていた。その後、1981 年のマウス ES 細胞の樹立、1988 年にヒト ES 細胞の樹立等の世界的な成果に対しても素早くキャッチアップし、多くの研究室でマウスやヒトの ES 細胞の樹立に成功し、これらを基に複数の幹細胞バンクが整備されるなどの研究環境の強化が進められた。予算的にも、2001 年以降に中国科学技術部（以下「MOST」と呼ぶ。）の大型基礎研究支援予算である「973 計画」や応用研究を支援する「863 計画」において、主要プログラムに発生再生研究が選ばれ、それ以降この分野に大幅な国の予算が投じられるなどの支援強化が行われている。また、若手研究者が欧米等に留学し、Nature、Science などに論文を出すようになり、それらの海外で活躍する人材に対する帰国促進政策等により、優秀な人材が国内の大学や CAS の研究所等に戻り、拠点創りが進むとともに、成果が出るようになってきている。

2008 年に中国は、iPS 細胞研究で画期的な成果を生み出した。それは、CAS 動物研究

所の周琪研究員（上海交通大学附属児童病院医学遺伝研究所の曾凡一副所長との共同研究）と、北京生命科学研究所の高紹荣研究員が、それぞれ独立にiPS細胞に由来するマウスを作製し、iPS細胞が多能性を持つことを初めて証明したことである。この成果は世界的にも高く評価され、NatureやCell Stem Cellというトップジャーナルに、論文が掲載されるとともに、米国の週刊誌「TIME」は、2009年度の「医学分野におけるブレークスルー」トップ10の発表で、中国人研究者による「iPS細胞誘発によるマウス育成の研究」を第5位にランクインさせた。

最近の政策の動きとして、第12次5カ年計画（2011ー2012年）「科学技術発展規画」（2011年7月4日 MOST）（以下、「第12次5ヶ年科技計画」と呼ぶ。）において、戦略的新興産業（7大産業）のうちバイオ・医療産業はその中でも重点的に推進分野として取り上げられていること、中国においても高齢化対策は大きな社会的な課題となっており、その解決のためにも医療分野の研究開発に力を入れていることなどがあり、予算（中国版NIHの設立等）及び拠点形成が大幅に強化、推進されている。特に、iPS細胞等の幹細胞研究については、基礎研究と先端技術研究の強化として、国家重要科学研究計画に、発生と生殖研究、幹細胞研究を位置付けるとともに、バイオと医薬技術の分野において、幹細胞技術を取り挙げ、これらを優位性のある分野として重点的･集中的に推進されている。

今回の調査に当たっては、事前調査として、中国の大型予算（MOST、中国国家自然科学基金委員会（以下、「NSFC」と呼ぶ。））等の取得研究者リスト、Natureクラスの論文を発表する等により、中国でも表彰やニュースになったことのある研究者のピックアップを行った。その上で、日本のiPS細胞研究の研究者を訪問し、中国に対する現状としての評価、今後の研究ポテンシャル、日中の連携等の可能性等についてヒアリングを行うとともに、事前調査資料も参考にして、中国における本分野の中心的な研究者、注目している研究者を推薦して頂いた。そのような中から、CAS動物研究所、北京大学生命科学院、北京生命科学研究所の三機関の研究者を訪問し、インタビューを行った。

3. 研究所訪問（その１～中国科学院動物研究所）

（1）訪問の概要

①訪問日時：2012年2月22日（水）
②訪問場所：中国科学院動物研究所　北京市朝陽区北辰西路1号院5号
③日本側訪問者：渡辺泰司　　科学技術振興機構　北京事務所長
佐藤真輔　　文部科学省　ライフサイエンス研究振興分析官
秦　舟　　科学技術振興機構　中国総合研究センター　フェロー
山之内裕哉　在北京日本国大使館　一等書記官
④中国側対応者：周琪（Dr. Qi Zhou）研究員　所長助理、計画生育生殖生物学国家重点実験室副主任、中国幹細胞学会理事、国際幹細胞フォーラム（ICFC）中国代表
孫江華 研究員　所長助理（国際担当）、中国科学院グリーン農業技術集積・発展センター主任、農業虫害鼠害総合統治研究国家重点実験室 副主任 他

写真 7－1　中国科学院動物研究所前で
左より、山之内（日）、渡辺（日）、周（中）、佐藤（日）、秦（日）

© 渡辺泰司

（2）中国科学院動物研究所の概要

中国科学院動物研究所（以下、「CAS 動物研」と呼ぶ。）は、中央研究院動物研究所、国家北京研究院動物研究所等の 3 つの既存の研究所が統合して、1962 年に設立された。

職員は 375 名（うち、研究者 181 名、技術者 87 名）、大学院学生約 520 名、ポスドク 70 名から構成され、研究者は主に欧米に留学していた者が中心で、日本留学組は 1 名のみとのこと。

2011 年の外部からの研究費は約 2 億元で、そのうち MOST からは 16 項目 1.4 億元、NSFC 等からは 5361 万元を獲得、CAS からも全体の予算の 3 分の 1 を受給、民間からも約 4000 万元で受託研究を行っている。

国際協力については、欧米等を中心にオーストラリア連邦科学産業研究機構（CISRO）、オタワ大学仏国国立農業科学院（INRA）等との共同研究、中仏動物胚細胞生物学共同実験室（LABIOCEM）、中豪バーチャル分類学研究室等を実施している。なお、CAS 動物研には、米国のスミソニアン博物館等に続く、世界 3 番目の標本数を誇る動物博物館が併設されている。

写真 7－2　中国科学院動物研究所全景

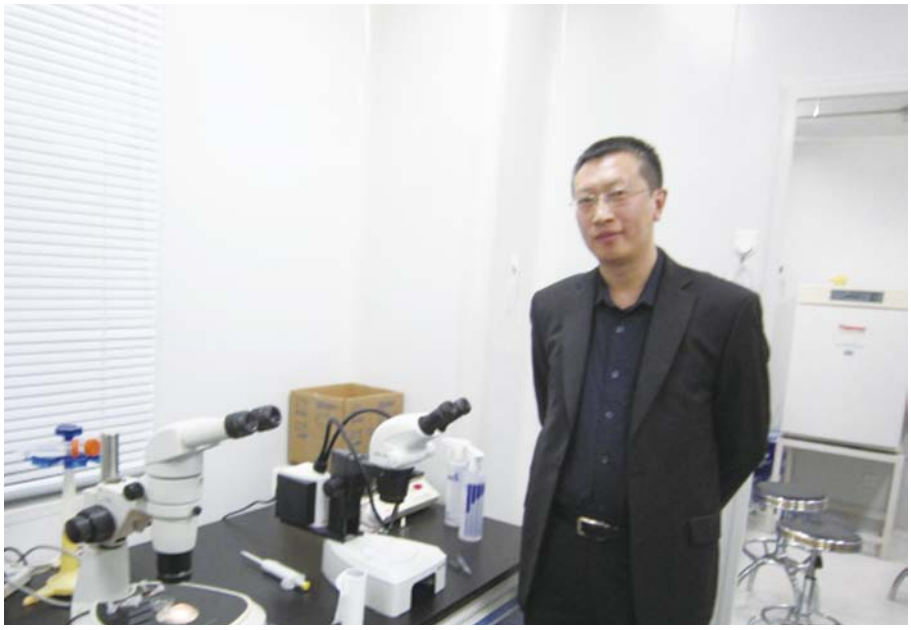
© 渡辺泰司

（3）周琪研究員の研究

今回インタビューを行った周琪研究員は、元々動物クローン（核移植）の研究者である。現在までにクローン化された主な動物 16 種のうち、6 種（ラット、フェレット（イタチ）等）のクローン動物の世界初の作製に関与している。 マウスについては、1997 年にハワイ大学の柳町研究室の若山照彦氏が世界ではじめて成功したが、周琪研究員は 1998 年に世界で 2 番目に成功しており、2004 年頃には理研（若山研）、ハワイ大と並ぶ、マウスの核移植技術の世界 3 拠点の一つであった。

周琪研究員は、中国の東北農業大学で 1996 年に博士号を取得後、1999 年から 2002 年まで、フランス国立農業研究センターでポスドク及びプロジェクトリーダーを務めた。2001 年には、CAS の人材招へい政策である「100 人計画」に採択され、幹細胞研究分野の研究を行うため 2003 年に帰国し、CAS 動物研の幹細胞研究部門を立ち上げた。帰国当時、中国の予算は大変少ないためフランスから支援を受け、2005 年には中仏の共同研究室（LABIOCEM）を立ち上げ、フランスから 2 名の研究者を CAS 動物研に受け入れた。2006 年には、中国で初めての幹細胞研究プロジェクトを CAS 動物研で開始している。

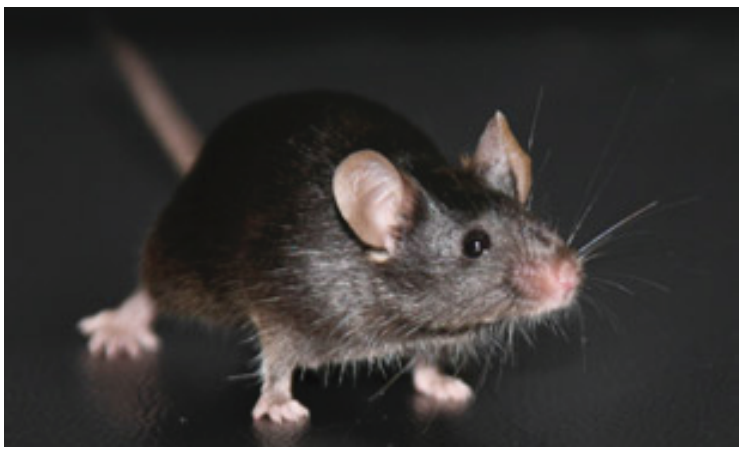
写真 7－3　周琪研究員と細胞核移植実験室
（左側の中央の顕微鏡を用いて小小を誕生させた）



© 渡辺泰司

iPS 細胞研究については、山中教授の発見以降、中国でも ES 細胞研究と並び高い関心を持って研究がされており、2008 年には前述したように周琪研究室で、4 倍体培養技術により iPS 細胞を用いたマウス個体の作製に世界で初めて成功し、同成果は Nature に掲載された。世界で最初に iPS 細胞から作成した動物（マウス）の名前を、中国名で「小小」（英語名「Tiny」）と付けたが、「小小」の写真は全世界で 6000 社以上の雑誌等に引用されたとのこと。なお今回のインタビューで、世界初のマウスの名前を「小小」と付けた理由としてマウスの体が小さかったからかと質問したところ、「成果としては大したことではないからです」と、謙虚に答えられたのが印象的であった。同研究成果は、2008 年の Nature の 10 大成果として選ばれ、中国国内でも多くの表彰等を受けたとのことであった。

写真 7－4　世界初の iPS 細胞マウス「小小」



出典：中国科学院ホームページより

その他の iPS 細胞関連の研究として、iPS 細胞は普通の細胞なのかどうか、ES 細胞と比較してどうかといった課題について、比較研究を行っているとのことである。前述の iPS 細胞マウスは、記憶等の成長には差が無いが、がん化の割合が 15 ー 20%以上高く、その子孫のがん化の割合も高いことから、現状では iPS 細胞の実用化にハードルとなっているが、初期の細胞培養や iPS 細胞化のプロセスによって大きく改善されるとの研究成果も出ており、安全性等に関する基礎的な研究を続けていくことが重要であり、将来の実用化に向けてこのような分野の研究を重点的に進めているとのことであった。その他、論文の発表において、欧米の研究者に対して中国やアジアの研究者は不利な状況にある、と強調されていたのが印象的であった。

（4）中国における幹細胞、iPS 細胞研究の動向

中国の iPS 細胞等の幹細胞研究は、主に北京、上海、広州、天津を中心に行われており、北京では CAS 動物研、北京大学、清華大学、臨床病院等で、上海では CAS 上海生命科学院、上海交通大学等で、広州では最近設立された CAS 広州生物医薬・健康研究院で、天津では臍帯血等血液関係を中心に研究が行われているとのことであった。

幹細胞バンクは上海に 2 か所あるほか、北京の CAS 動物研、広州、天津、湖南省にそれぞれ 1 か所と合わせて 6 か所あり、そのうち 5 か所は MOST から支援を受けて設置されている。ヒト ES 細胞については、一説には 4000 以上の樹立細胞があるとの話もあるが、ES 細胞バンクに正式に登録されているものは 150 株程度であり、上記の 6 箇所のうち天津以外の 5 か所で保存しているとのことであった。

幹細胞を利用した臨床研究に関するガイドラインとして、2003 年 12 月 24 日に、衛生部と MOST の連名で「ヒト胚性幹細胞研究倫理指導原則」が制定されており、日本ではできない治療用のクローン作製等が、中国では可能となっている。胚性幹細胞は、他の細胞とは切り離して、制限無く使える体制が整っている。

予算額としては、973 計画により、幹細胞プログラムに基礎研究として 5 年間で約 12 億元（招集者：周琪氏）が予定されており、また 863 計画として、幹細胞・組織技術プログラムに応用研究として 5 年間で約 1 ー 1.5 億元の計上が予定されている。これとは別に NSFC がエピゲノム研究に対して年間で約 1.5 億元年が計上されており、その約三分の一の予算が幹細胞研究に充当される。

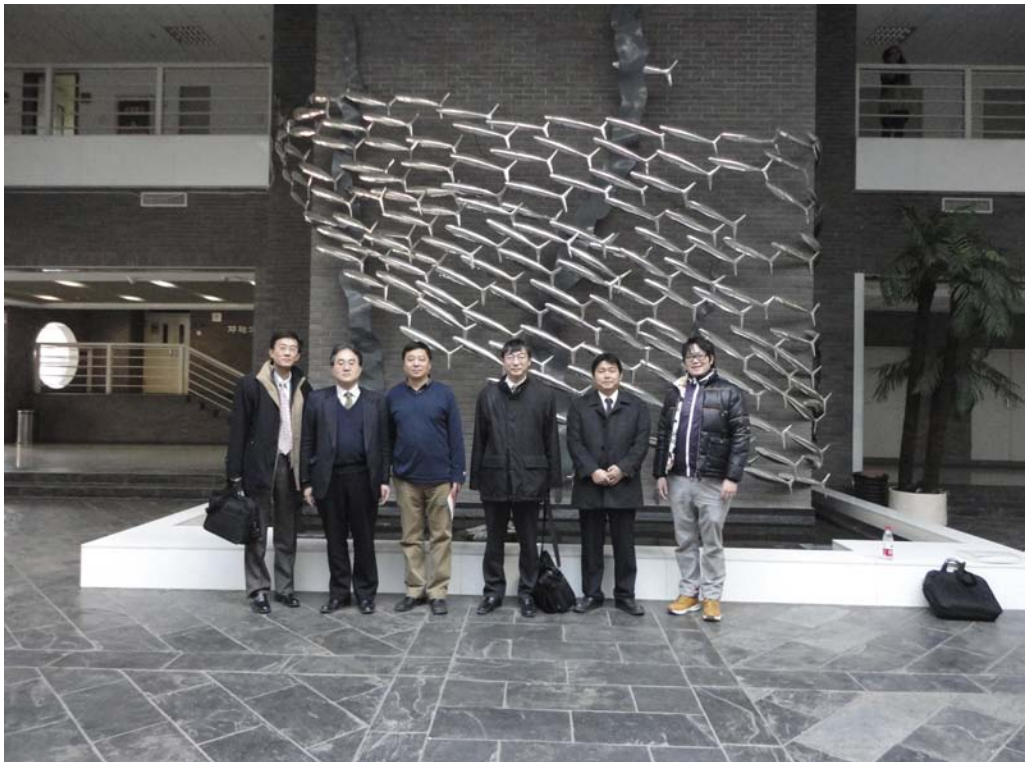
中国全体では、第 12 次 5 ヶ年科技計画期間中に、幹細胞研究に対して年間約 30 億元が投入される計画である。また CAS では、傘下の 18 研究所の 84 実験室（約 2000 人の研究者）に対して、5 年間で約 9.4 億元が支援される計画であるとのこと。なお、幹細胞研究への投資は直ちに利益につながらないこともあり、現状では民間の投資が極めて少なく、ほとんど公的支援に依存しているとこのことであった。

4. 研究所訪問（その２～北京大学生命科学学院）

（1）訪問の概要

①訪問日時：2012 年 2 月 23 日（木）
②訪問場所：北京大学生命科学学院　北京市海淀区頤和園路 5 号
③日本側訪問者：渡辺泰司　　科学技術振興機構　北京事務所長
　　佐藤真輔　　文部科学省　ライフサイエンス研究振興分析官
　　秦　舟　　科学技術振興機構　中国総合研究センター　フェロー
　　山之内裕哉　在北京日本国大使館　一等書記官 他
④中国側対応者：鄧宏魁（Dr. Hongkui Deng）北京大学生命科学学院 長江特聘教授 他

写真 7－5　北京大学生命科学学院内で
左より、李（日）、渡辺（日）、鄧（中）、佐藤（日）、山之内（日）、秦（日）



© 渡辺泰司

（2）北京大学における幹細胞研究

北京大学では 2000 年に、幹細胞研究センターが設立された。現在、北京大学には、幹細胞の研究をやっている実験室が約 40 あり、うち幹細胞専門の実験室が 20 程度ある。中国全体では 200 ー 300 の幹細胞の研究室がある。北京大学は、幹細胞研究センターを中国ではじめて作り、研究者数も相当な規模となっている。特に過去 2 年間で、若手の優秀な人材が集まってきている。また、清華大学や CAS 等との連携も強化している。現在のセンター長は上海に異動することになっており、後任のセンター長に今回インタビューした鄧宏魁教授が就任予定とのことである。

北京大学の特徴としては、中国で最良といわれる医学部があり、またその傘下に 9 つの附属病院があることであり、医学部と附属病院との連携により、ヒト幹細胞に関連する臨床応用等の研究でも有利である。北京大学のもう一つの特徴は、医学、生物学、材料等の異分野の横断的な研究ができることで、東京大学医科学研究所と良く似ている。生命科学学院の地下には、マウス等の共同利用実験動物センターがあり、豚等より大型の動物は学外で飼育している。

写真 7－6　北京大学生命科学学院全景

© 渡辺泰司

（3）鄧宏魁教授の研究

鄧宏魁教授は、2006 年の山中先生の iPS 細胞に関する研究を受けて、中国で最初に幹細胞研究をはじめた一人である。研究分野としては、細胞の初期化、ヒト ES 細胞の分化誘導、再生医療を中心に研究している。鄧宏魁教授は、マウス、ラット、サル等の実験動物を使った基礎的な研究を行うとともに、鄧宏魁教授が属する北京大学の医学部・附属病院が、中国での人工受精等の生殖医療の中心的な役割を担っていることから、ヒトの ES 細胞や iPS 細胞を用いた再生医療に研究の重点を置いているとのこと。

具体的な研究成果として、iPS 細胞の樹立方法において、P53（がん抑制遺伝子）経路の制御により、iPS 細胞の品質と樹立効率（約 100 倍）を高めるとの研究がある（2008, Cell Stem Cell)。この成果は、山中教授らのグループの他、ソーク研究所、ハーバード大学、スペイン国立がん研究センター（2 グループ）の 5 グループが、2009 年 8 月 Nature に、p53 経路と iPS 細胞樹立の関係を解析をした論文が同時に掲載されたことに繋がった。この研究は世界的なレベルの研究として、日本や欧米の研究者から高く評価されている。

また、iPS 細胞の樹立についても、2008 年にサル iPS 細胞を、さらに米国（上海チーム）と共同でラット iPS 細胞を、それぞれ世界で初めて樹立し、いずれも Cell Stem Cell に発表した。2011 年には、山中因子のうち、1 遺伝子で iPS 細胞を樹立するなどの成果を上げてきている。

最近は、これらの iPS 細胞樹立等に関する基礎的な研究とともに、樹立した細胞の分化誘導に関する研究を行っており、2007 年にヒト ES 細胞の肝臓細胞への分化誘導、2008 年にマウスの核移植 ES 細胞の膵臓の β 細胞への分化誘導に成功し、インシュリン産生の β 細胞分化手法を確立している。この手法は世界で評価され、世界中で同手法が使われているとのことであった。

写真 7－7　鄧宏魁教授とその幹細胞保存施設

© 渡辺泰司

政府からの支援として、鄧教授が研究代表者として提案した「ヒトの多能性幹細胞が膵臓のβ細胞や神経細胞へ分化するメカニズムの研究」が、国家重大科学研究計画（973 計画）に 2012 年度実施課題として採択されたとのことである（予算：1,370 万元（前期 2 年間））。

鄧宏魁教授は、米国留学（UCLA）組であり、HIV の研究で学位を取得し、2003 年の SARS 発生時に政府のアドバイザーを務めるなど、疾患モデル動物研究分野の第一人者であり、2005 年よりビル＆メリンダ・ゲイツ財団から支援を受け、HIV 及び HCV 感染モデルマウスの開発、2009 年より、肺炎双球菌肺炎の簡易早期診断法の開発等を実施している。 今年からは 3 期目ということで、合計 8 年間（3 期＝ 2 年 +3 年 +3 年）で、ゲイツ財団からの助成額は 190 万米ドルとなっている。

5. 研究所訪問（その３～北京生命科学研究所）

（1）訪問の概要

①訪問日時：2012 年 2 月 24 日（金）
②訪問場所：北京生命科学研究所　北京市昌平区中関村生命科学園科学園路 7 号
③日本側訪問者：渡辺泰司　科学技術振興機構　北京事務所長
　　山之内裕哉 在北京日本国大使館　一等書記官
④中国側対応者：高紹荣（Dr. Shaorong GAO）　北京生命科学研究所　研究員（Associate Investigator）

写真 7－8　高研究室前にて
左から渡辺（日）、高（中）、山之内（日）

© 渡辺泰司

（2）北京生命科学研究所の概要

北京生命科学研究所は、ライフサイエンスの基礎研究のフロンティアを開拓するため、国際的な競争力を持つ新しい研究所として、北京市政府、MOST の支援によって設立された。2003 年に建物の建設が開始され、2004 年に研究所がオープンした。

将来のライフサイエンス分野の人材育成のため、主任研究員（PI）を国際的な高い競争の中から選抜し、5 年間の任期で自由な研究ができる環境を整備した、中国では全く新しいシステムを導入したユニークな研究所である。PI は、国際的な応募者から、所長の下に設けられた選考委員会で選考しており、現在の PI は 27 名となっている。PI の中には、早ければ 3 ー 4 年で CAS や大学等に移る人も多く、異動はいつでも可能である。ただし、予算的にも施設的にも研究環境は、北京生命科学研究所が中国国内で一番良いと思っている。

北京生命科学研究所の共同利用施設として、例えば実験動物について 1 万ケージ以上のマウス・ケージがあり、利用料として 1 日、1 ケージ当たり 1 元の料金がかかる。遺伝子解析やエピゲノム解析等のためのシークエンサーは、5000 塩基対単位で解析、一部は BGI 等に委託することなどを行い、低料金での利用が可能である。

写真 7－9　北京生命科学研究所全景

© 渡辺泰司

（3）高研究員の研究

高研究員は、2000 年に CAS 動物研で博士号を取得、英国ロスリン研究所のポスドクとしてクローンマウスの作製等の研究に従事、2002 年から 2004 年に米国テンプル大学医学院においてマウス体細胞核移植リプログラミングのメカニズムを研究、2004 年からコネチカット大学の再生生物学センターで助教をした後、2005 年に北京生命科学研究所の研究員として帰国した。米国で研究していた時には、ハワードヒューズ財団等からの支援を受けていた。

帰国後は、北京生命科学研究所から研究費として、2005 年ー 2011 年までは Assistant Investigator として年間 2 百万元（約 2.5 千万円）、2012 年からは Associate Investigator として毎年 3 百万元（約 3.8 千万円）をもらっている。北京生命科学研究所は、研究チームを構成するため北京科技大学、首都師範大学、中国農業大学、北京大学、清華大学等との間で共同プログラムを実施しており、高研究室では、現在、大学院生を中心に約 20 人の陣容で研究を実施している。ポスドクについては、博士号を取得し 4 ー 5 年間北京生命科学研究所で研究した後、北京生命科学研究所で、博士号を取得した後は、研究所に残ってポスドクとなる研究者はほとんどおらず、欧米に留学する者が多い。このような状況なので、中国でポスドクを確保することは難しく、せっかく育てた学生が、欧米に取られるようで不公平と感じているとのことであった。

写真 7－10　高研究室の細胞核移植装置

© 渡辺泰司

研究内容は、一貫してマウス等の体細胞核移植による細胞の初期化のメカニズム研究であり、2009 年には前述の CAS 動物研の周琪研究員と同時期に、iPS 細胞マウスの個体の作製に成功し、Cell Stem Cell に成果を発表した。iPS 細胞から作製したマウスは、3 代目までは特に問題なかったが、6 代目ぐらいから問題がある個体が生まれることが多いとのこと。iPS 細胞作製時の培養条件等によってその頻度が異なることから、このような違いを iPS 細胞や ES 細胞等のリプログラミングの比較を行い、細胞分化の分子的な機構の解明を目指している。基本的に山中因子（4 因子）と同じ条件でやっているが、Oct4 を別のファクターに置き換えて（2 因子等でも実施）、初期化の確立を 15 ー 20%アップ、高品質化することに成功したが、Nature や、Cell Stem Cell 等に投稿しても受け付けてもらえず、アジアの研究者に対する不公平を感じることがある。

iPS 細胞マウスの作製を目指すきっかけは、北京大学の鄧宏魁教授が主催したセミナーで京大の山中教授が講演された際に、山中教授と面談したことである。山中教授より iPS 細胞マウスがまだできていないことを聞き、核移植の専門家として自分でトライしたところ、当時約 1%の確率で発生させることができ、発生した 4 匹のうち 1 匹を生存させることができた。これを発表したところ、たまたま CAS 動物研の周琪研究員の論文と同時期になったものである。

現在はマウス以外に、国からの支援もされやすい臨床応用等も考えてヒトでも行っており、ヒトの細胞入手については広州の病院と連携している。また、ウサギもマウスより個体が大きいということで使っている。

6. 中国 iPS 細胞研究の特徴

今回の中国側の訪問先は北京市内の研究所のみであり、広州や上海等の研究拠点、6 カ所あると言われる幹細胞バンク等の全体を見て、初めて正確な分析ができると考える。しかし今回の訪問先は、いずれも Nature や Cell Stem Cell クラスのインパクトの高い成果を出して世界が注目しているラボであるので、今回はそれらを中心に分析を試みる。

（1）世界トップレベルに並ぶ研究の出現

iPS は極めて最近発見され、世界各国で一斉に競争が始まったこともあり、中国のような比較的ライフサイエンスの歴史が浅く蓄積が少ない国においても、十分に世界トップレベルに並ぶ研究が可能となる。

これを証明したのが、今回インタビューした CAS 動物研の周琪研究員と北京生命科学研究所高紹荣研究員による、核移植技術をベースとしたクローン動物の作製である。当時、iPS 細胞由来の個体を生みだす取り組みは欧米や日本等で試みられていたが、なかなかうまくいかなかった。このため、欧米等の研究者の中には、iPS マウス等を作製できないということは、iPS 細胞が多能性を持たないという証拠ではないかとの主張もあったと聞く。つまり、ES 細胞と違い、発生再生の基礎となるものとなり得ないとの主張である。それが、中国の二つのチームの努力により、iPS 細胞の多機能性が確認された訳である。

今回インタビューしたもう一人の研究者である、北京大学の鄧宏魁教授の研究も、やはり世界トップレベルの研究と呼ぶにふさわしいものである。それは前述のように、iPS 細胞の初期化においてがん化を抑制する遺伝子を制御すると、ヒト iPS 細胞の品質と効果

を約 100 倍高められることを、2008 年に世界で初めて発見したものである。

（2）移植・再生医療応用

中国では、iPS 細胞 の基礎研究だけでなく、移植・再生医療につなげる研究も熱心である。例えば北京大学の鄧教授によると、北京大学は中国国内でも最も高いレベルの医学部、附属病院を持っており、このような他部門との連携による臨床研究分野に、力を入れて行くとのこと。全国的にも、ES 等の幹細胞バンクが整備されるとともに、医学部系の強い有力大学（上海交通大学、中山大学、同済大学、軍の大学等）では、ヒトの iPS 細胞や ES 細胞等を分化誘導し、それを再生医療等の臨床研究につなげる努力が進められているとのことであった。

（3）予算支援や拠点整備等

iPS 細胞研究を支える予算や拠点整備について、中国は積極的に支援している。12 次 5 ヶ年科学技術計画として、中国全体で幹細胞研究に対して、約 30 億元 /5 年を投入する計画である。

CAS は、2011 年 1 月より北京、上海、広州、昆明の 4 つのコア研究センターと、18 の研究所（84 実験室（約 2000 人の研究者））を整備して、幹細胞と再生医療研究の世界レベルの研究プラットフォームを構築することにしている。この幹細胞・再生医学先導特定事業に、約 9.4 億元 /5 年を支援する計画である。

CAS 以外の大学、臨床病院等においても、北京周辺で約 20 か所、上海周辺で 50 か所、その他、広州、天津（臍帯血等血液関係等）においても研究を実施しており、多くの研究者がすそ野の広い研究を行っている。

中国の基礎研究のファンディング機関である NSFC が、2011 年に公募した幹細胞プロジェクトにおいて 533 課題が採択され、そのうち約 30 課題が iPS 細胞関連の研究であった。

（4）共通基盤等

既述のように、iPS 細胞を含む幹細胞バンクは、中国全体で 6 か所がある。また、幹細胞を利用した臨床研究に関するガイドラインが 2003 年に既に制定されており、日本では現在できないような治療用のクローン作製等が中国では可能となっている。

さらに現在、北京大学、清華大学、上海交通大学、復旦大学、中山大学等に臨床研究等の拠点としての病院の整備を行っており、昨年 7 月に衛生部の陳竺部長は、臨床治療とトランスレーショナル医学を牽引するために全国に約 100 の国家レベルの医学センターを設立する計画を発表している。

このように、中国は研究そのものだけでなく、関連する共通基盤等の整備も極めて熱心であることが判る。

7. 日本側から見た中国 iPS 細胞研究の特徴

中国側調査に併せ、日本国内の大学、研究機関の iPS 細胞研究者等を訪問し、中国における iPS 細胞研究等の実力、注目しているアクティブな研究者（研究機関･大学等）等、

将来の日中協力の可能性等について、ヒアリングを実施した。

（1）ヒアリング実施機関及び研究者等

①理化学研究所 発生・再生科学総合研究センター（CDB）等［2012 年 1 月 24 日］
相澤慎一 ボディプラン研究グループリーダー
笹井芳樹 器官発生研究グループリーダー
西川伸一 幹細胞研究グループリーダー
高橋政代 網膜再生医療研究チームリーダー
鍵本忠尚（株）日本網膜研究所アドバイザー
盛　国俊　初期発生研究チームリーダー
ダグラス・シップ 広報国際化室長
会澤正樹 神戸研究所研究推進部企画課長

②京都大学 iPS 細胞研究所（CiRA）等［2012 年 1 月 25 日］
中畑龍俊 副所長・特定拠点教授
青井貴之 規制科学部門・教授
高橋　淳 准教授
白橋光臣 iPS アカデミアジャパン（株）ライセンス部長
工藤周三　同　課長
粟田真理子　同　知的財産・法務部
長田直樹 所長室室長・特任准教授

③慶応義塾大学 医学部［2012 年 1 月 26 日］
岡野栄之 生理学教室教授

④東京大学医科学研究所 幹細胞治療研究センター［2012 年 1 月 27 日］
大津　真　特任准教授
下坂皓洋 学術支援専門職員（アジア細胞治療学会会長）

⑤文部科学省ライフサイエンス課［2012 年 1 月 27 日］
板倉康洋課長
釜井宏行課長補佐

⑥科学技術振興機構研究領域総合運営部［2012 年 1 月 26 日］
石井哲也調査役・PO

（2）中国における注目研究者

日本の iPS 細胞研究者が注目している研究者と研究機関を列記する。（順不同）

①鄧宏魁（Dr. Hongkui DENG）北京大学 生命科学学院 教授（今回インタビューを実施）
②裴端卿（Dr. Duanqing PEI）CAS 広州生物医薬・健康研究院院長、華南幹細胞・再生医学研究所 所長
③周琪（Dr. Qi ZHOU）CAS 動物研所長助理、計画生育生殖生物学国家重点実験室 副主任（今回インタビューを実施）
④曾凡一（Dr.Fanyi ZENG）上海交通大学附属児童病院 医学遺伝研究所 副所長
⑤王鋼（Dr. Gang WANG）中国細胞生物学会会長、中国科学院上海生物化学・細胞研究

所所長助理
⑥程涛（Dr. Tao CHENG）中国医学科学院・北京協和医学院 血液学研究所・血液病医院 実験血液学国家重点実験室 主任
⑦裴鋼（Dr. Gang PEI）同済大学学長、CAS 上海生命科学研究院前院長
⑧高紹栄（Dr. Shaorong GAO）北京生命科学研究所 研究員（今回インタビューを実施）

（3）中国における研究の現状

中国における研究の現状について､インタビューした日本側の研究者の意見を列記する。

・数年前までは、オリジナリティが無く研究のクオリティも低いとの印象であり、研究のレベルとして注目する程のものは無かった。この 2 年位前から、論文のレベルとしてオリジナリティは抜けていないが、クオリティでトップやスタンダードレベルのものが出ているとの印象を持っている。欧米等に留学していた優秀な研究者が帰国し、ファーストオーサーの研究レベルが上がり、データがきれいになり、コントロール方法も上手くなり、国際スタンダード以上の論文がどんどん出てきている。

・中国の幹細胞の基礎研究については、欧米留学組等が北京大学、清華大学、中国科学院等に戻り、拠点を創るなど体制整備を進めている。

・中国については、人口が多くお金があり、規制はあまり厳しくなくパワーがあるとの印象を持っている。実力的にも、CAS 動物研と上海交通大学が行った、マウスの iPS 細胞から個体を発生させた研究については、ハーバード大学等でもできなかったテトラプロイド（四倍体）と ES キメラから作成するという丁寧な研究がなされるなど、評価している。中国の勢いにプレッシャーを感じている。国際共同治験についても、脊髄損傷等に関する症例も出てきている。

・iPS 細胞研究について、2008 年以降、特にこの 1、2 年の中国の勢いは凄いと感じている。被引用件数上位の中国の論文を調べたところ、引用件数が 1 年間で 16 回以上のものが 8 論文あった。そのうち、CAS の周琪教授等の iPS 細胞を使ったマウスの個体の作製、北京大学の鄧宏魁教授のヒトの iPS 細胞を 100 倍の効率で作成する研究などは、日本人の研究者が 2009 年にやった方法を、それに先駆けて 2008 年に既に、中国で同様の方法がやられていたなどの成果を見ると、ビックリするものがある。幹細胞から作られた膵臓細胞を移植し、インシュリンを使わない糖尿病治療等の分野では、世界初の治療が中国で開始されるような話もあり、この最近 2 年ぐらいは特に注目するようになってきた。

・オリジナリティや全く新しい発見といった面ではまだ弱く、培養条件等の変更や、初期化の効率等を高めたり、マウス以降のラット（上海）やブタ等の別の種で個体化を試みる、などの研究が多い印象を持っている。

（4）中国 iPS 研究の今後の発展性

中国における iPS 研究の今後の発展性について、インタビューした日本側の研究者の発言を列記する。

・今後は、中国においてもオリジナリティの高いものも出てくると考えるが、そのためには中国国内でのボトムアップが有る程度必要で、欧米等に留学していた優秀な研究者が帰国し立ち上げた大学等の拠点が重要となる。そのような世界レベルの拠点で国際スタンダード以上の研究者が育てた、ポスドク等の次の世代の研究者が PI となり彼らが論文を出すようになると、オリジナルのものが出てくると思う。イメージとしては、それまでの期間は次の 3 ー 4 年ではないか。海外から戻った研究者は直ぐに偉くなり、ベンチでの研究は嫌いになる人が多いが、Cell Stem Cell のようなトップジャーナルで論文を出すような経験を積んだ人が育って、少なくとも数名は出てくると思う。

・臨床研究等の実施体制（病院）については、中国の予算や体制等の伸び方は大変早く、特に臨床においては、日本の東大がやっと 1300 床と小規模なレベルであることと比較すると、清華大学、北京大学、同済大学、中山大学等が数千床の大規模な病院を創っており、このままだと日本は全く立ち行かなくなる。韓国も、ソウル国際大学等が 2000 床やそれ以上の病院を新設しており、臨床研究の規模の差がどんどん開いているのが現状である。

・中国での臍帯血移植は、病院の規模が大きく圧倒的に症例数が多いこともあり、いい論文も沢山出てくるようになった。山東臍帯血バンクでは、第 1 ー第 5 病院まで、全体で 1 万床のベッド数を持つ病院で、年間 8000 分娩を行っているとのことで、日本では大きな病院でも 2000 分娩でしかないことを考えると、規模の差が大きい。また、欧米も含め、海外の場合には、臍帯血移植を実施する拠点は 5 ー 6 ヶ所と集中しているのに対して、日本は分散していることも問題である。治験や臨床研究は、日本がレベルではリードしていても、規模が小さいので進まないのに対して、中国や韓国は同じプロトコールを採用し、規模において日本を凌駕している。

・細胞バンクに関し、臍帯血バンクについては、中国協和医科大学及び中国科学院の支援により、国の管理下の天津臍帯血造血幹細胞バンクを中心に、全国に 6 ヵ所の拠点を整備していると聞いている。

・その他の臨床研究については、疾患バンク、臨床用のヒト幹細胞バンク、臍帯血バンク等に力を入れており、多くのバンクが整備されつつあるが、中国でもやはり論文中心のところがあり、臨床全体をまとめ上げるコーディネーション機能が無く、みんなバラバラにやっているとの印象がある。したがって、中国でもトラスレーショナルリサーチに関しては、まだ難しいところがある。

・中国では、2010 年より、欧米並みの GMP 基準を満たすことが義務付られ、創薬にも力をいれている。そのために国家レベルの重点拠点を創っており、米国 NIH、MD ア

ンダーソンがんセンター、デューク大学等との連携等、欧米を中心に国際協力が行われている。

・臨床研究については、日本の企業においても、例えば（株）新日本科学が、広東省に前臨床試験を実施するための実験動物（霊長類）供給センターを整備するなど、中国との連携を深めている。

・中国における再生医療、遺伝子治療等については、体性細胞や末梢血幹細胞等の再生医療への応用は少ないのが現状であり、臨床が追い付かず時間が無く、新しい課題に付いていっていないところがある。患者の方も､お金のこともあって治療にのみ興味があり、治験等に理解がないところもある。ただ国は 400 以上の病院を治験病院として指定し、カルテ等の情報は全国民がカードで管理されるようになり、個人情報の保護を前提に、徐々に治験等に利用できる体制を整備、改善してきている。FDA で承認された臍帯血移植、軟骨、心筋等を、中国の規制当局の SFDA も承認する方向にある。日中韓はもっと交流して、アジアのシーズをアジアで治療する仕組みを構築していくことが重要である。

・幹細胞の臨床応用については、2012 年 1 月、中国の衛生部が、軍の病院等で実施していた幹細胞治療について、医療技術の臨床応用に関する管理弁法（2009 年 5 月施行）を守っていないとして、半年間の治療中止の指導をしたとの報道があったが、中国でも国際的なレベルでの基準策定とその実施に対する意識が高まっていると理解している。

8. 今後の日中協力

日本と中国との iPS 研究での連携・協力について、インタビューした日本側の研究者の発言を列記する。

（1）人材交流

・日本と中国との連携の中でも最も重要なことは、優秀な人材の育成・交流であり、今までも多くの日本への留学生が、日本と中国の双方で活躍している。優秀な人材が欧米や日本に留学し、彼らが中国に戻って活躍できる場が整備されてきたことが中国の伸びている理由であり、例えば医療の分野では、京大は復旦大学と数年前に MOU を締結して、主に診療の分野で復旦大学を京大の窓口のような形で位置づけ協力を進めている。

・日本に中国等の優秀な人材が留学するために、①日本の研究者は中国の講演会等で必ず話をする、特に北京大学や清華大学等の優秀な人材がいる大学には、日本での教育・研究等の活動を宣伝する、②サマーキャンプやサマースクール等を実施して、日本での研究・生活を体験する機会をつくる、③日本への留学・PI で活躍する場を設ける、等が必要と考える。

（2）国際会議

・中国では、2007 年には上海で国際幹細胞研究シンポシウム（CAS 上海生命科学院徐国良氏が中国側の委員会メンバー）を開催、昨年の 10 月には蘇州で CSH Asia との共催で国際コンファレンスを開催するなど、上海、蘇州、北京、広州等で国際会議を開催しており、日本からも多くの研究者が参加している。

・一方、科学技術振興機構等からも支援を受けて、2012 年 6 月 13 日ー 16 日に横浜で、第 10 回 ISSCR 年会が開催される。山中先生が現在 ISCF の会長をされていることもあり、この ISSCR の横浜会合に中国をはじめアジアからも多くの人材が集まるよう、例えば北京、上海、広州等で講演会等を兼ねたキャラバンを実施し、できるだけ多くの研究者や学生が日本へ行って留学や日本で研究してみたいと思ってもらう努力が必要ではないか。

・中国では、コールドスプリングハーバーとの連携によって、蘇州で CSH Asia の会合を開き、欧米や日本等の最先端の研究者の発表を聞ける場を国内に誘致した。フランス、英国、ドイツ等は、アタッシェ等がお金を出して研究者同士のミーティングの場を支援しており、日本もそのような場をアレンジするべき。

（3）臨床研究等の連携

・臨床研究について理研は、加齢黄斑症の治療として iPS 細胞を使った再生医療の臨床研究を国内で実施する予定であるが、日本での実施と並行して患者の数が多く欧米並みに治験等の体制が整いつつある中国や韓国でも臨床研究を実施したいと考えている。具体的には､理研のラボで昨年まで研究者として所属していた温州医学院の金子兵教授(宮崎大学で 4 年間研究して PhD 取得後、3 年間 CDB で研究に従事し、現在、温州医学院（眼科の病院としては中国随一）の教授）が、中国における臨床研究の実施に向けて準備を進めており、連携していく予定である。

・京都大学においても、iPS 細胞を用いてパーキンソン病等の細胞移植療法の開発を行っており、将来の臨床研究においては中国等との連携も必要と考えているが、現在のところカウンターパートとなる研究者等がいないので、まずは相手を探して交流し、個人的な信頼関係を構築していくことが重要だと考える。

・中国は、欧米に比べて前臨床としての動物実験等がやりやすく、霊長類を使った前臨床研究、GMP 基準の臨床試験・検査施設等の利用等のクオリティも上がっており、治験も治験病院等の整備が進んでいるので、この分野での連携も視野に入れていく必要がある。

・臨床用の細胞バンクに関し、山中先生が進めようとしている iPS 細胞バンクや幹細胞のバンクにおいて、日中韓で協力していくことも重要と考える。

・iPS 細胞バンクについては、人種的にも距離的にも近い日中韓が、連携していくことが

重要である。HLA の型が同じ人の多いトップ 10 の人種間に共通（コモン）の細胞については、日本で頻度の高いものは、韓国でも 6 割が共通している。中国は民族も多く多様であり、レアな型のものも多いという特徴がある。今なら日本は無視される存在ではないので、声をかけていけば中国、韓国とも話を聞いてくれる。

・まずは人種間に共通（コモン）のもの 1、2 種類を共通の HLA ホモバンクとして、日中韓の国際的な連携の枠組みで構築することから始めるべく、昨年（2011 年）夏に韓国の済州島で、中国の CAS 広州生物医薬・健康研究院の裴端卿院長、韓国のヨンセイ大学のチャー・インス教授と話し合いの場を持った。

・なお国際的な連携について、欧米と中国との間では、例えば米国と英国が iPS 細胞研究の情報交換会を実施するなど連携を深めているのに対して、日本との連携は少ないのが現状であり、日中間でコネクションを創って影響を及ぼしあうことは、これからの国際的なボーダレスの時代に日本にとって最も重要な課題と思う。

（4）規制・ガイドラインの共有

・中国における安全性や倫理に関する規制については、ISCF や ISCI 等の国際会議で、研究者との交流がある。

・実際に iPS 細胞バンクを構築していくのには時間がかかるので、共通の土台としてインフォームドコンセントの方法について、コンセンサスを創ることから始めて、その上で、ハイブロブラストやプロセッシング等の基準化を図っていくといったステップ・バイ・ステップで協力を進めることを考えている。そのため、まずは日本側から、インフォームドコンセントの方法についてドラフト案を作成して、両国に意見を求めるべく準備を進めているところである。

・キリンビール（株）は 1997 年に、中国医学科学院等と連携して麒麟鯤鵬（中国）生物薬業有限公司という合弁会社を設立し、ヒト組換えの G-CSF やエリスロポエチン等の生産を中国で行っており、保険適用もされている。中国では新規の薬等の許認可について、国レベルのものと省レベルのものがあり、国レベルだと難しい場合でも省レベルでできる場合等がある。

・自己の細胞を移植する場合、中国の場合、基本的に外科と同じ医療行為として認められるが、日本の場合、ウイルスをかけて組換えをしたものを戻す場合には国レベルの審査があり、実質的に動いていない。個人的な意見としては、複数の患者に普遍的に用いる場合は、国レベルで審査をすることが必要だが、個人に対する 1 対 1 の医療行為の場合には、中国と同様に必要ないのではないかと思う。

・個別の課題として、加齢黄斑症の iPS 細胞による治療については、日本では 5 年前から使用されている抗 VGF 薬のルセンティという薬が中国では使えない等の課題がある。中国の場合、欧米等と同様に、ES 細胞に比べて iPS 細胞はまだ安全性が確立されてい

ないとの評価があるようで、レギュレーションをクリアするのが一つの課題になっている。

（5）知財関係

・大学等の知財の実施（ライセンシング）について、実施先として中国にも興味を持っており、最近中国の情報収集をはじめたところである。iPS 細胞を売ったり、iPS 細胞の作製・利用等に関するトレーニング体験コース等も始めており、中国に顧客を求めてコンサルタント会社を通じて市場性調査も開始した。米国のバイオ 2011 に出席した際に、バイオ・チャイナの規模に圧倒された。中国と既に連携しているベンチャー企業であるディナベック社にはライセンシングを行っており、中国に関する情報交換も行っている。

・実施に当たっては、基本的にアカデミアに対しては無償となる。日本の場合、臨床研究はライセンス無で可能であるが、治験になると企業が入ってくるのでライセンスしている。中国の場合には、大学や研究機関が治験を実施している場合もあり、日本とは異なる可能性があることに留意が必要である。

（6）協力の際の課題、問題点等

・日本の大学の一部の研究所では、現在、知財等の問題で中国からの留学生は断っているところがある。しかし、人材の質や中国の研究レベルを考慮すると、今後の方向として、うまく提携協力していく必要があると思っている。受け入れに当たっては、よく知っている中国側のカウンターパートから、大学院生を派遣してもらうことが大切と思う。

・経済産業省が、COCOM 規制の一環で国内の 20 ヵ所以上の大学や研究所を指定しており、iPS 細胞は大量破壊兵器ほどの扱いではないと思うが、国際協力における難しさもある。

・中国等との共同研究については、欧米流のやり方とかけ離れた面もあり、相手の状況を理解した上で戦略的に付き合っていく必要がある。

・歴史的、人的な繋がり（留学経験等）からも、日中、日韓の協力は欧米との協力とは異なる。アジア地域に特化して、地域でお金を共有できる仕組みを構築すべきである。大切なのは、お互いに課題、問題があることを研究者同志で話し合い、お互いに人材を育成、協力をしていく仕組み作りが重要である。例えば HFSP のような研究基金を設立し、その中で、いい人材が育つ環境づくり、評価、サマーキャンプ等による人材を伸ばす仕組み創りなどを行っていくことが重要である。

9. 中国の iPS 研究の将来性、課題

（1）将来性

今まで見てきたように、中国における iPS 細胞研究は、クローン家畜動物等の細胞核移植研究分野の伝統を基に、ES 細胞研究等の研究者が、日本や欧米とほぼ同じ時期に研究を開始し、一定の成果を上げてきている。また、研究者の殆どは欧米等に留学、中国政

府の優秀な人材の帰国促進政策（百人計画、長江学者、千人計画等）によって、多くの人材が帰国し、北京、上海、広州等に短期間の間に、大規模な拠点を整備することができたこと、政府の予算も大幅に増加したこと等から、近年、論文数等も大幅に増加している。（iPS 細胞関連 2011 年中国 29 件（米国 172 件、日本 68 件に次。科学技術振興機構の石井 PO 調べ）、幹細胞研究 2010 年中国 677 件（米国 3,643 件、日本 741 件に次。理研のシップ室長より））

国内の体制整備も、急ピッチで進められている。2009 年、中国政府は NSFC に、中国版 NIH とも称される医学科学部門を整備し、NSFC の約三分の一の予算を本分野に投じる目標（現在は、五分の一）を掲げ、国内の研究者の支援の強化を図っている。臨床応用の拠点についても、北京大学では、9 つ目の附属病院として、北大国際病院（1800 床）を、清華大学では、第 3 附属病院（第 1 期 1000 床、最終的に 3000 床）を、いずれも、2013 年に開業するべく建設中である。さらに全国の有力大学で、臨床研究やトランスレーショナルリサーチ拠点の整備を進め、世界中から優秀な人材を国際公募している。

国際協力についても積極的であり、2010 年には NSFC と米国 NIH との間で協定（MOU）を締結し、医学科学分野における両国間の研究者の共同研究の支援を開始するなど、連携促進を図っている。

中国は、このような取組み等によって着実に iPS 細胞研究などのレベルアップを進めているが、さらに 5 年から 10 年後には、中国が外国人研究者を含めた知的人材の集まる拠点（ハブ）となることを目指していると考えられる。

（2）課題

今後の課題としては、若手人材を国内で自ら育てていく環境整備には時間を要すること、iPS 細胞の臨床研究のガイドラインは未整備であり、安全性や倫理面等での制度設計が必要なこと、産学連携の取組みなどを通じた民間企業等との連携について、CAS と広東省等との間で取り組み等も始まっているが、まだこれからであること等が挙げられる。

いずれにせよ、中国も少子高齢化を迎え、健康・医療分野の政策に特に力を入れており、その政策がどのように実現されていくのか注目される。

10. 参考文献等

W Yuan, D Sipp, Z Wang, H Deng, D Pei, Q Zhou, T Cheng, Stem Cell Science On the Rise in China, Jan 6,2012, Cell Stem Cell 10, 12-15,
http://www.cell.com/cell-stem-cell/abstract/S1934-5909（11）00583-2

「幹細胞および再生医学」（第 51 号、2011 年 1 月号）（Science Portal China 中国科学技術月報）

「日中両国の「再生医学」「再生医療」への取組み」（第 26 号、2008 年 12 月号）（Science Portal China 中国科学技術月報）

第八章　手術ロボット

科学技術振興機構　研究開発戦略センター
フェロー（電子情報通信ユニット）
嶋　田　一　義

1．世界の手術ロボット開発

（1）医療用ロボット等の市場規模

2011 年の世界の医薬品市場は 8800 億米ドルに達するとのレポートが発表されている（ミクス Online より）一方で、世界における医療用ロボットとコンピュータ支援手術機器（Medical Robotics and Computer-Assisted Surgery）の売り上げは 2010 年におよそ 20 億米ドル規模であり、医薬品市場と比較すると 1% をはるかに下回る小さな存在であることがわかる。しかし、この市場は今後拡大の方向にあり、2016 年までには 36 億米ドル以上に達すると予測されている。そして、2010 年における市場の 2/3 以上を米国が占め、今後もその状態が続くという（株式会社グローバルインフォメーションのプレスリリースより）。

（2）医療ロボットの国際的動向

医療用ロボットの技術水準の国際的な動向を見ると、米国が研究水準から産業技術力まで全てで先行している。産業技術力の観点からは、米国のベンチャー企業である Intuitive Surgical 社が開発した、マスター・スレーブ型手術支援ロボットの「daVinchi」が、圧倒的な競争力を有している。このロボットは、1997 年にベルギーの Cadiere らが初めて臨床に用いた後、世界で累計 1500 台以上を出荷しており、日本でも 2010 年に認可された。米国発のその他の医療ロボットとしては、リモートプレゼンス技術を活用した InTouch Health 社の患者との遠隔対話（病院回診用）ロボット「RP-7i」が販売され、かなりの成功を収めている。また、Willow Garage 社でもテレプレゼンスのロボットが開発され､外部からの引き合いが多いようである。このように米国発の医療用ロボットは、ベンチャー企業が先導している。

一方欧州では、DLR 社、Simens 社、KUKA 社を中心に、ロボット技術の医療応用が進んでいる。また、歯のインプラント手術支援システムを商品化しているドイツの RoboDent などが新ビジネスを展開している。KUKA は患者の位置決めにロボットを追うようしたシステムを開発し、Siemens ではロボット技術を応用した血管造影検査装置を販売している。

日本は研究開発には実績があり、医工連携による先進医療開発実用化プロジェクトや NEDO インテリジェント手術支援機器研究開発プロジェクトなどが進められている。また､学際ネットワークである日本医工ものづくりコモンズで､議論が活発になされている。しかし残念ながら、治療を中心とする医療への応用に関しては、日本特有の厳しい規制のため事業化が難しく、企業に目立った動きがなく、ビジネスには至っていない。現在、厚生労働省と経済産業省の連携による「介護・福祉ロボット開発・普及支援プロジェクト検討会」が始まっているので、この進展に期待したい。

2. 中国の手術ロボット開発

（1）開発の歴史

中国では、ロボット製造技術については世界的にかなりのレベルにあることから、ロボットの医療応用が比較的早く研究されてきた。

1995 年から、北京航空航天大学と解放軍海軍総医院は共同で、シミュレーションに基づくロボット支援システムを開発した。1997 年には Puma262 工業用ロボットを原型に、脳外科手術支援ロボットによる第 1 世代定位システム CRAS を共同で開発し、2000 年に海軍総医院で初の脳外科手術用のパッシブ型ロボットが臨床に使われた。現在、このシステムは第 5 世代になり、手術のオートメーション化レベル、精度、安全性のいずれも著しく改善されている。2004 年にこのシステムは、神経外科用ロボットシステムの臨床許可証を取得し、北京市の医療保険診療にも適用された。現在 20 余りの病院に導入されており、5000 例以上の神経外科の定位生検術に成功した。

また同年、香港中文大学において、初の手術用ナビゲーション用ロボットアームのサンプルマシンが臨床に利用され、ナビゲーションのモニタリング下で穿孔してボルトをはめる操作を正確に行うことができた。2006 年に天津大学は、マスター・スレーブ方式による顕微鏡外科手術用ロボットシステム「妙手（MicroHand）システム」を開発した。「妙手システム」は、フォースフィードバック機能を持つ商業化された Phantom Desktop マスターアームであり、顕微鏡外科手術の正確な操作を実現した。

同じ時期に、上海交通大学と上海第二医科大学は共同で、膝関節全置換手術に適用可能な新型器具を開発した。これには、7 次元の調整可能なサポートアーム及び 5 次元のサーボモータ駆動ロボットアームがある。このシステムの巧みで堅牢な機械構造により、かつての支援ロボットに比べ、より柔軟で便利に手術の操作が行えるようになった。腹腔鏡の最小侵襲手術ロボットの分野では、天津大学とパリ第六大学が共同で最小侵襲手術ロボット MC2E システムを開発した。このシステムには 4 次元であり、人体に直接設置可能で、フォースフィードバック装置もある。すでに動物（ブタ）の心臓で実験が行われている。

2007 年から 2009 年にかけて、清華大学、華中科技大学、東南大学等は最小侵襲血管足場材のデジタル化設計及び製造を行い、心血管インターベンション用超小型器材、軟組織穿刺等の分野でも関連の研究を実施している。

このように、中国ではいくつかの大学や研究所でロボットを製作し、病院と提携して臨床応用の試みを実施するという努力が行われている。

（2）最小侵襲脊髄手術ロボットが年間十大科学ニュースに

2010 年に開発された最小侵襲脊髄手術ロボットは、中国科技日報の年間十大科学ニュースに掲げられた。この手術ロボットは、中国第三軍医大学新橋医院と瀋陽自動化研究所との共同研究の成果である。

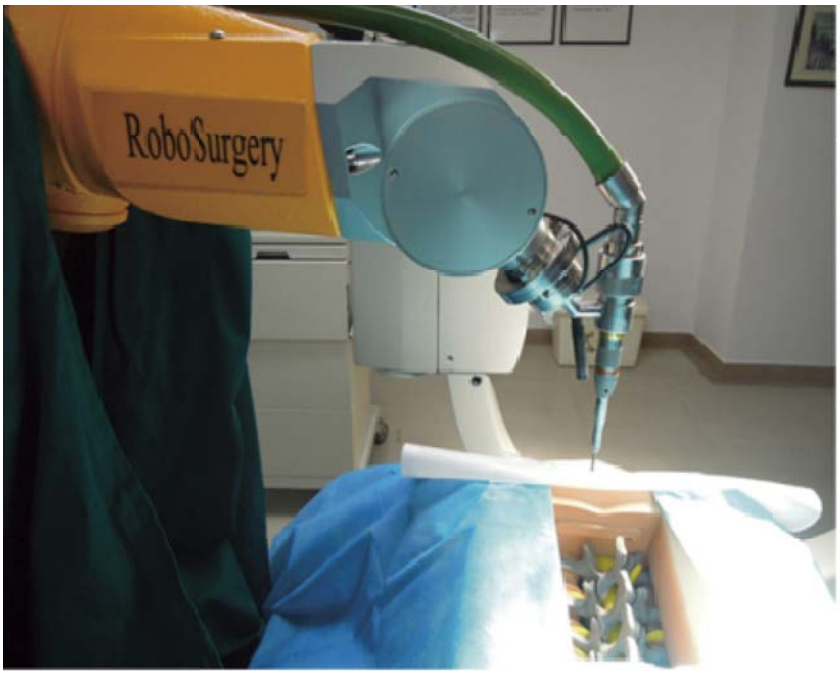
整形外科手術用のロボットは、関節の交換手術から使われ始めた。1992 年から中国では約 50 台導入され、ひざ関節や股関節の交換に使われてきた。脊髄の手術は高い精度が要求され、X 線での撮影を行いながらの手術になるため、医師の被ばく量が問題となり発達が遅れていた。ロボットによる誘導が可能になれば、医師の被ばく量を減らすことができる。また骨用の手術ロボットは、臓器を対象とした医者のオペレーションに頼るタイプ

のもの（DaVinchi が有名）と異なり、より高度な知能化ができる可能性がある。骨は臓器よりも構造が硬質で、位置決めが容易だからである。

そこで、このロボットの開発が開始されたのであるが、現時点では脊髄に精度よく穴をあけられる技術の確立が当面の目標で、特定の病気を想定した研究ではない。今後、脊髄癌や脊椎損傷など様々な用途が想定されている。

今回、このロボットが世界でもトップレベルにあるのではないかとの考えで、関係する施設を訪問し、研究者にインタビューを行うこととした。

写真 8－1　最小侵襲脊髄手術ロボット



© 嶋田一義

3. 研究所訪問（その 1 ～中国科学院瀋陽自動化研究所）

（1）訪問の概要

①訪問日時：2012/2/20 14:00-15:00
②訪問場所：遼寧省瀋陽市
③日本側訪問者：嶋田一義　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　フェロー
林　幸秀　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　上席フェロー
小菅一弘　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　特任フェロー
米山春子　科学技術振興機構　中国総合研究センター　フェロー
④中国側対応者：田孝軍（Tian Xiaojun）　副研究員（Associate Professor）

（2）瀋陽自動化研究所の概要

中国科学院瀋陽自動化研究所は、中国科学院傘下の 105 の研究所の一つである。1958 年設立され、現在正式職員は 600 人強、科学院院士 2 人が在籍している。

写真 8－2　中国科学院瀋陽自動化研究所

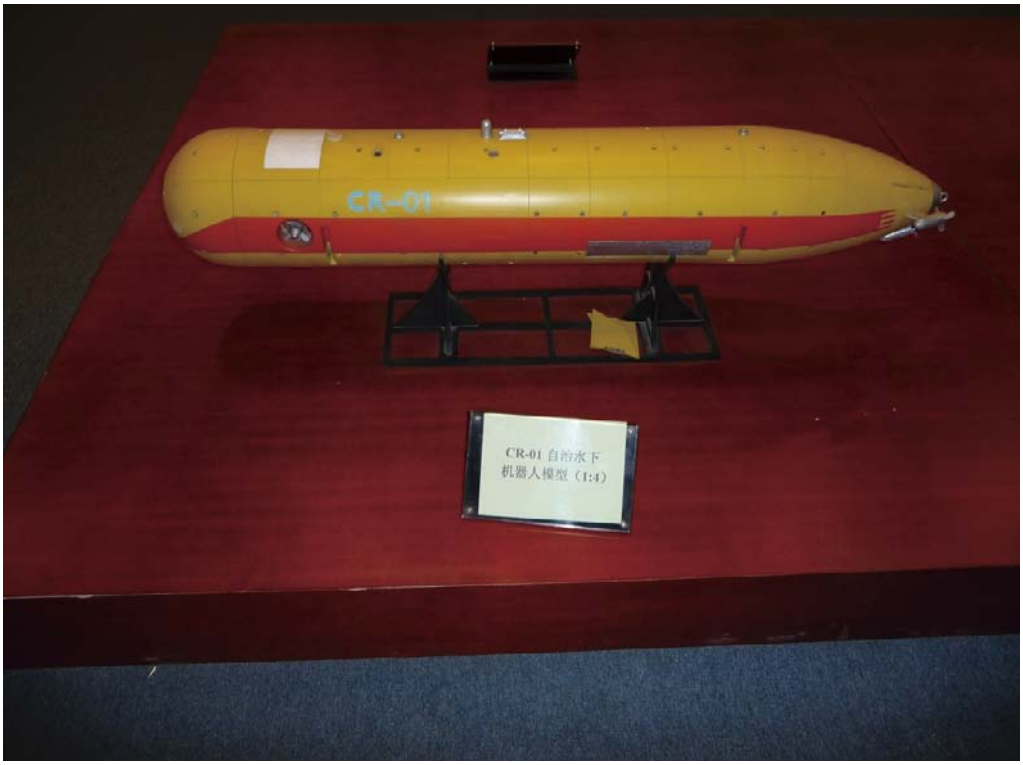
© 嶋田一義

中国科学院瀋陽自動化研究所では、1980 年代からロボットの研究を始め、現在、ここのロボット研究室は国家重点実験室となっている。2000 年に、その一部門だった研究所が独立して「新松機器人自動化公司」となり、2009 年に株式上場。中国ハイテク企業の象徴的な企業に成長している。その他、3 つのスピンアウト企業がある。

今回の調査では､中央政府の評価会と重なったため手術ロボット開発者には面会できず、手術ロボット開発について掘り下げた議論はできなかった。

なお、中国科学院瀋陽自動化研究所は、海中における無人自動化ロボットの開発では、世界的に有名であり、北極海の氷海調査用のロボット（Polar ARV）や、深海鉱物資源探査用のクルーズ型ロボット（CR-02）などを開発している。この写真のロボットは、CR-02 の一世代前のロボット（CR-01）で、広報館に展示されていた。

写真８－３　無人海中探査ロボット



© 林　幸秀

4. 研究所訪問（その２～重慶新橋医院）

（1）訪問の概要

①訪問日時：2012/2/22 11:00-14:00
②訪問場所：重慶市
③日本側訪問者：嶋田一義　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　フェロー
　　林　幸秀　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　上席フェロー
　　米山春子　科学技術振興機構　中国総合研究センター　フェロー
④中国側対応者：周躍（Yue Zhou）科主任・教授（Professor & Director）

（2）重慶新橋病院の概要

重慶新橋医院の正式名称は、第三軍医大学第二付属医院である。中国建国時、鄧小平氏が率いる西南軍区に属していた。第三軍医大学には三つの付属病院があり、それぞれ4,500、3,500、3,500 床あり、合計で 10,000 床以上の病床数を持つが、患者はいつも廊下にあふれている。

第三軍医大学病院の学生は、半分が軍人、半分が民間人である。患者は民間人を中心に受け入れている。今回訪問した第二病院は、50 年の歴史を持ち、敷地面積はアジア最大（6万 km^2）とのことであった。

写真 8－4　第三軍医大学付属第二病院

© 嶋田一義

（3）周躍教授と手術ロボット

重慶新橋医院の骨科主任医師の周躍教授は、今回視察の目的である手術ロボット研究の責任者であり、同医院でロボットの臨床前期実験を行った。実験の結果としては、術前のプランニング・シミュレーション及び術中ナビゲーションの精度および安全性が確認されたものの、自動制御システムの開発は今後の課題ということであった。

中国国産最小侵襲脊髄手術ロボットの開発は、多くの大学や研究所で取り組まれているが、新橋病院のものも含めてまだ実際の手術で使われたことはないという。なお、米国発の手術ロボット「daVinchi」は中国でも導入されており、現在、中国国内のトップレベルの病院に 10 台程度あって、手術の症例を重ねながら問題がないかを検討している段階にある。これまでの結果から、手術ロボットは精度が高く低侵襲であるために合併症の発症が少ないことがわかっている。ただし、費用は通常の手術の 2 倍かかるため、患者側が負担できる場合のみ使われているという。

なお手術ロボット開発と関連して、周躍教授のチームで携帯電話大のマニピュレータを開発し、脊髄手術用として実験しているところであるという（イスラエルの会社と開発したとのこと）。

写真は、手術ロボットと責任者の周躍教授である。周躍教授は、非常に穏やかな人格者に見えた。視察の最後に、軍服を付けた重慶新橋医院のナンバーツーと面会したが、彼は周躍教授の存在を大変誇りにしていた。また、この病院には若い医師の研修者がかなりいるとのことで、彼らのレベルアップのためにも医療レベルの高い日本との協力を熱望していた。

写真８－５　最小侵襲脊髄手術ロボットと周躍教授

© 嶋田一義

5. 研究所訪問（その３～上海交通大学医学院）

（1）訪問の概要

①訪問日時：2012/2/24 8:00-9:00
②訪問場所：上海市
③日本側訪問者：嶋田一義　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　フェロー
林　幸秀　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　上席フェロー
小菅一弘　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　特任フェロー
米山春子　科学技術振興機構　中国総合研究センター　フェロー
④中国側対応者：張持雷（Zhang Shilei）
上海交通大学医学院付属第九人民医院口腔額面外科、
副教授、副主任医師、医学博士

（2）上海交通大学の概要

上海交通大学は、経済、法律、文学、科学、工学、農学、医学、管理科学、芸術の 9 分野をカバーし、東の MIT と呼ばれる総合大学である。33 人の科学院院士、92 人の正教授・長江招聘教授、1900 人以上の教授・助教授を擁する。学生は、17,766 人の学部生、24,017 人の修士・博士課程学生が在籍。工学系の研究者と医学系研究者の協力が容易という。

実際に、Med-X 研究院というバイオメディカルエンジニアリングに興味を持つ研究者が大学全体から集まった研究プラットフォームを形成し、ここを中心に学際的な取り組みも盛んである。

写真 8－6　上海交通大学の模型
（中心に高速道路が走っている。これでも 4 つあるキャンパスの一つにすぎない。）

© 嶋田一義

（3）張持雷教授と頭部手術ロボット

上海交通大学医学院の張持雷教授は、頭部と首のロボット手術を専門に手掛けている。

エンジニア、メディカルドクター、学生数名の約 10 人で研究室を運営し、ロボット開発に当たっている。張持雷教授のチームは日本との関係が深く、エンジニアは電通大の梶谷研出身とのことであるし、張持雷教授自身も日本のロボット手術の先駆者といわれている慈恵医大の鈴木直樹先生と交流があるという。

装置は、ドリルのついたロボットハンドの他に、位置決め装置とナビゲーションシステムによって構成される。このナビゲーションシステムは、張持雷教授の研究室で研究開発されたものであり、中国国内で昨年認可が下り市場に出す予定で、上海の医療器具メーカーと協力しているという。欧米のナビゲーションシステムが大体 30 万ユーロのところ、その半額で販売する予定とのことである。

中国では、制約なしに手術ロボットの使用が認可されているわけではないが、患者との間で手術ロボットを使うことを合意できれば、合法的にロボット手術を行うことができる。張持雷教授は、これまでロボット手術を 2 例実施し、頭蓋骨の変形を修正する手術に成功しているが、これは頭部をロボットで手術した例としては世界初とのことであった。

写真８－７　張持雷教授の頭部手術ロボット（デモンストレーション）

© 嶋田一義

写真８－８　張持雷教授の手術ロボット前で
左３人目から嶋田（日）、張（中）、林（日）、小菅（日）、米山（日）

© 嶋田一義

6. 中国の手術ロボット開発についての考察

（1）手術ロボットの自主開発

外科用ロボットは1980年代後期に登場したが、現在、商業化されFDAの認証を受けている主な外科手術ロボットシステムには、イソップ（AESOP）システム、ゼウス（ZEUs）システム、ダヴィンチ（DA VINCE）システムがある。これに遅れること10年、中国の手術ロボット開発は、1990年代中盤から進められているようである。

北京航空航天大学と解放軍海軍総医院が共同で進めているロボット支援システムの開発は、現在、第5世代まで開発されており、性能は著しく改善されているという。このシステムは、2004-2005年に神経外科用ロボットシステムの臨床許可証を取得し、北京市の医療保険診療項目に入れられ、現在、20余りの病院に導入されて5000例以上の神経外科の定位生検術に成功している。

定位システムだけでなく、パッシブ型、アクティブ型のロボットアームや術前プランニング、実際の加工などの技術も国内で開発されており、2006年に天津大学で開発された「妙手」等、臨床応用に供されているロボット技術は多い。また、今世紀初頭から遠隔手術の研究開発も行われており、解放軍海軍総医院、北京航空航天大学、北京積水潭医院等が開発に取り組んでいる。

今回の調査で注目した脊髄手術ロボットに限って言えば、重慶新橋病院のものも含め、まだ実際の手術で使われたものは無いようだ。ただし、その他の手術ロボットを広く見渡せば、様々な試みがなされており、実際に患者の了解を得て手術に使われている中国産のロボットは多くあるようだ。今回訪問した上海交通大学の張持雷教授も、頭骨の手術で複数例の成功例がある。一方で、世界市場で販売されているものがあるか否かは未確認である。今回研究室をいくつか訪問した感触では、大学の有力な研究者の多くが国内外の企業との共同研究を精力的に進めている様子であり、中国産の手術ロボットが世界市場で普及する日も近いように思われる。

（本節は、上海交通大学医学院の張詩雷副教授の記事をもとに作成した。）

（2）海外ロボットの導入とその臨床応用

一方で、中国は海外のロボットを積極的に導入しており、ロボット手術の症例数は、北京の人民解放軍病院で乳房、心臓、腸などの手術で1000例以上、新橋病院でも250ー300例あるという。

技術に対する考え方も、自前主義ではなく、必要な機能が調達できるならば海外からでも買ってくればよいという姿勢であるため、技術の導入は早い。症例数を重ねるうちに、その技術を使いこなしていけば、独自技術も開発されてくるはずだ。特に、ロボットは、机で沈思黙考するよりもむしろ、新しいものを現場で作り出そうと考えることで新しい課題が見つかり、新しい技術が生み出されていくという傾向が強い。従って、市場があり技術を使おうとする旺盛な意欲があれば、自ずと発展には前向きなフィードバックがかかるはずである。そういった点で、技術そのものが学術的に高度か否かといった観点に目を奪われていると、新しいパラダイムを見逃すおそれがある点に注意が必要である。

日本の医療用ロボットに関し、「日本企業は、ヒューマノイドロボット関連技術は高いが医療用ロボットの技術はない」という認識を、重慶新橋病院の博士研究員が持っていた。

これは事実とは異なると思う。しかし、技術があっても市場に出すハードルが高い日本の現状を、よく反映しているかもしれない。

（3）不正防止のための規制の功罪

もう一点、これは証拠があるわけではないのだが、中国の有力な研究者と会って意見交換をしていると、企業や政府の資金をかなり精力的に獲得し、自由に使い、自らの研究やビジネスに還元している人が多いように感じる。日本では不適切であるとされるような使途も、中国では含まれうるように感じる。そしてこの自由さが、この人たちをここまで元気にしているのではないかと推測したくなる。

日本は、公平性と透明性を追求するあまり、規制を遵守することに研究者やそれを支援する人たちの人件費を投入しすぎてしまっていないか。こうしたお金や人の使い方が、日本全体の元気をそいでいるのではないか。そういった懸念を覚えた。

米国のナショナルアカデミープレスから 2010 年に発行された「Rising Above The Gathering Storm, Revisited」の 1 章の冒頭（p.16）に掲げられた米国の前国防副長官 John Hamre 氏の逸話を思い出す。彼がロンドンのヒースロー空港で会った、二人のビジネスマンの話である。一人は中国から帰国する途中で、中国の工業団地で製造施設を建設中に、中国政府が建設や労働者の供給について迅速な支援を行っている話。もう一人は米国の工場の拡張工事に従事しており、新しい環境アセスメントが必要なために建設局に相談に行こうとするが、担当者は「利害相反の可能性」を理由に会ってくれないという話。経済発展にひたすら突き進む中国と、不正を排除するための様々な仕組みが整備され、がんじがらめになっているアメリカの現状を象徴する逸話として紹介されている。

アメリカや日本の規制を悪者にすることはできない。様々な不正や事故を防ぐために蓄積されてきた英知が現在の規制と考えれば、中国は不正や事故が起こりやすいかもしれないからだ。不正を防ぐ代償として私たちが失っているものを訴求することは難しい。何故なら、不正や事故を防ごうとする正義には勝てないからである。従って私たちは、現在ある規制を無くすのではなく、同様かそれ以上の機能を維持しつつ皆が元気に働ける環境を作るという、より困難な課題の達成に取り組まなければ、中国のような新興国と互角に競争していけないという現実に気付く。

7. 今後の日中協力

（1）臨床応用に進みやすい

中国の場合、患者との合意があれば、ロボット手術を合法的に導入できるため、新しい技術の導入が様々な規制によって阻まれてしまう日本と違って、研究開発が進みやすい。また、人種が近いことから、欧米の症例を蓄積するよりもアジアで症例を蓄積する意義は大きい。その意味で、中国と共同開発、共同研究を進めることのメリットはあると考えられる。

（2）知的財産への配慮

一方、共同研究を行った際の権利帰属や利益の分配については、事前に取り決めておく必要がある。運用は大学あるいは個人によって異なる可能性が高いため、注意が必要であ

る。日本側で雛形を持って交渉すべきだろう。

（3）give and take が前提

もう少し長期的な観点で見ると、中国の自由な研究風土の中で様々な試行錯誤を行うだけでは、give and take が十分でないように思われる。こちらのアイデアと先方のアイデアを合わせて研究を進めるという、ラボに閉じた共同の在り方だけでなく、自由な研究を進める中に潜む様々な負の側面についての認識を中国の研究者と共有し、それを解消していく努力も行っていくことが、日本の科学技術コミュニティの使命ではないか。それは、日本の規制を先方に押しつけるという単純な話ではない。日本の規制が機能的なものとは限らない。中国の現場で、高潔な倫理観を持って判断し、日本よりも機能的な規制を作り出してそれを日本に輸入することで、日本の研究開発環境を変革していくという取り組みもビルトインさせるのが良い。中国の市場を単なる実験市場ととらえるのではなく、人類全体の共通善への貢献を中国の人たちと作り出すという大きな目標設定が必要だ。

企業に技術を提供させて新しい装置を作るという取り組みが多く、海外の大学等と共同研究をするという形式は、中国科学院瀋陽自動化研究所と重慶新橋病院では特に見られなかった。軍と関係の深い研究所や医院は、機密事項が多く、日本との研究は難しいかもしれない。

（4）これまでの日中の交流を生かす

今回訪問した大学では、日本の大学の先生や企業との共同研究を多く行っていた。その多くは、日本に留学経験のある学生と、日本の大学の先生の間に構築された太い信頼関係が基盤になっているように見受けられる。こうした関係が協力の拡大に必要であり、日本にやってくる優秀な留学生を大切に育て、日中間で研究開発の協力を行う前提で、息長くつきあっていくことが非常に重要であるという実感を得た。また、今回の出張に同行していただいた小菅一弘教授（東北大学）は、IEEE の Robotics and Automation Society の President を務められた経験もあり、中国の主要な研究者とのパイプも太い。こうした有識者間のつながりは、一朝一夕にできるものではないことに鑑み、国際的な科学コミュニティでの活躍を応援することや、こうした経験を持った有識者との協力による効果的な国際共同研究の推進を検討していく必要があるだろう。

8. 参考文献等

ミクスオンライン記事「2011 年世界医薬品市場 8800 億ドルに　リピトール特許切れも次の大型品が上市へ　IMS」2010/10/20
Global Information, Inc. 記事「世界における医療用ロボットとコンピューター支援手術機器の売上げは、2016 年に 36 億米ドルに達する見通し」2011/10/13
Intuitive Surgical 社ホームページ
JST 研究開発戦略センター『電子情報通信分野　科学技術・研究開発の国際比較 2011 年版』2011 年
家入里志、橋爪誠「MR 画像誘導下の超精密ロボット手術の臨床応用を目指して」MEDIX（日立メディコ技術情報誌）, Vol.49, 2008 年

InTouch Health 社ホームページ
Willow Garage 社ホームページ
学際ネットワーク設立準備会ホームページ
厚生労働省「介護・福祉ロボット開発・普及支援プロジェクト検討会　資料」2010 年
慈恵会医科大学高次元医用画像工学研究所ホームページ
JST 中国総合研究センター『中国の科学技術力について　ビッグプロジェクト編』2010 年
張詩雷「外科手術用ロボットの実用化及び研究の現状」サイエンスポータルチャイナ記事、2012/2/13

第九章　光学天文台「LAMOST」

科学技術振興機構　研究開発戦略センター
特任フェロー（海外動向ユニット）
辻　野　照　久

1．調査目的

ガリレオガリレイが 400 年前に天体望遠鏡を製作し、木星や土星を大きい倍率で観測して以来、世界中で天文台が建設され、宇宙論モデル、宇宙の大規模構造、銀河の形成と進化等が天文学者によって研究されてきた。またアマチュア天文家も、個人用の望遠鏡で興味深い天体観測を行っている。

最近の天文観測は、人間の目で直接宇宙を見るのではなく、光学系を通して取得した微かな光を CCD に記録したり、分光計でスペクトルを取得したりすることが一般的になっている。特にスペクトルを分析することで、天体の構成物質や生い立ちの特徴などを知ることができる。天体望遠鏡による観測は可視光だけでなく、X 線・赤外線・電波などさまざまな波長範囲にわたっている。また望遠鏡の性能は口径や視野角などで表され、どのような目的で観測を行うかによって設計が異なっている。

中国においては 1993 年以降、1000 万個の恒星や 1000 万個の銀河のスペクトルを世界で最も効率よく観測できる、ユニークな全天観測用大型光学望遠鏡「LAMOST」（大天区面積多目標光繊光譜天文望遠鏡）の開発を、国家プロジェクトとして実施してきた。2009 年に完成した LAMOST は、天文研究に重要な貢献を行うことが期待されている。LAMOST の口径は約 4m 相当で、わが国の「すばる」（口径 8.3m）や米国の大双眼望遠鏡（口径 11.9m）には及ばないが、全天観測の視野角が 5 度と世界最大であり、1 回の観測で 4000 個の恒星のスペクトルを同時に取得できる。一夜で最大 5 回観測でき、観測効率が世界最高であることがこの望遠鏡の最大の特徴である。LAMOST は光学設計の面ではシュミット式望遠鏡の一種であり、光軸を折りたたむことで全長が短くなることと、撮像専用に適していること、他の大型望遠鏡で開発経験があることなどが、この方式を選んだ理由と考えられる。

今回の調査では、LAMOST の機能、性能、運用状況等について現地で調査するとともに、天文分野における今後の日中協力の可能性について検討した。

2．LAMOST 視察

（1）訪問の概要

①訪問日時：　2012 年 3 月 6 日（火）12 時 30 分ー 14 時
②訪問場所：　河北省興隆県　国家天文台興隆観測站
③日本側訪問者：辻野　照久　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　特任フェロー
　　渡辺　泰司　科学技術振興機構　北京事務所長
　　山之内裕哉　在北京日本国大使館　一等書記官
　　秦　　舟　　科学技術振興機構　中国総合研究センター　フェロー
④中国側対応者：薛　随建　　中国科学院国家天文台　院長補佐

施　建栄　　中国科学院国家天文台　研究員

写真 9－1　興隆天文站にて
左より秦（日）、渡辺（日）、山之内（日）、崔向群（中）、辻野（日）
（崔氏は中国天文学会理事長）

© 秦　舟

（2）訪問の全般的所感

中国が、国家の最優先の一大科学技術プロジェクトとして、建設を開始してから約 10 年の歳月をかけて完成させた LAMOST は、今回の視察で設計通りの性能を実現したことが確認でき、全天サーベイを効率よく行うことができる天文台として注目に値する。

（3）開発の経緯

1993 年 4 月、国家天文台の王綬琯（元北京天文台長）と南京大学の蘇定強が、中国の天文分野における重要観測施設として LAMOST プロジェクト計画を国家に提出した。彼らは文化大革命の時期に、世界の天文学の急速な発展動向、特に X 線から電波に至る全周波数帯域での天文観測が主流になっていることを知り、中国で実現可能な世界的貢献の具体策を考えていたのである。その後 LAMOST プロジェクトは、国家の最優先の計画と決定され、2001 年 9 月に建設工事が開始された。2008 年 8 月にすべてのハードウェアの設置が完了し、同年 10 月に落成した。落成後、「LAMOST」は中国名で「郭守敬（Guo Shoujing）望遠鏡」と呼ばれるようになった。郭守敬は元王朝時代の天文学者（1231 年生 -1316 年没）で、一年の正確な日数や夏至・冬至の時期の計算、天文観測装置の開発、新しい暦法（授時暦）の作成などを行ったことから、中国では偉大な天文学者として尊敬を集めている。

LAMOST の開発予算は 2.35 億元で、全て中国科学院が拠出している。運用主体は中国科学院国家天文台の LAMOST 運用・発展センター（郭守敬望遠鏡運行和発展中心）で

ある。2011 年 10 月の全天サーベイ正式運用開始時の集会には、各地の天文台や大学など 18 機関で 105 名の利用者が参加した。

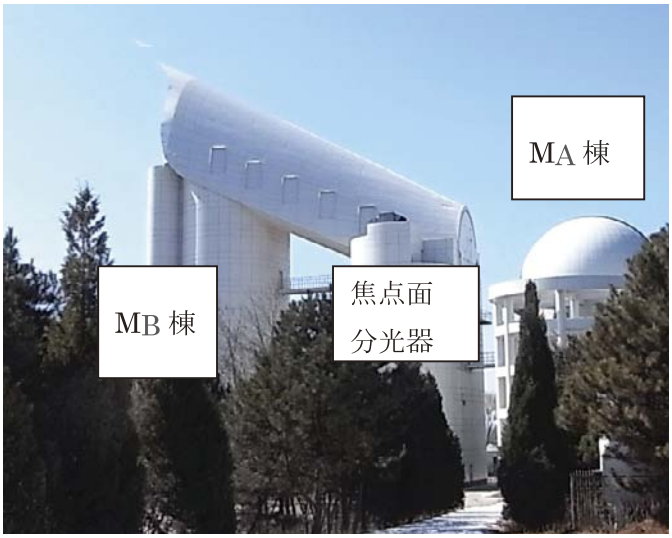
（4）立地場所

LAMOST が設置されている河北省興隆県は、北京の東北東約 120km のところにあり、町の中心部は海抜 400m 程度である、LAMOST は町の東部の山頂にある。北京からは、自動車で京承高速道路を経由して、約 3 時間で行くことができる。ただし雪が降ると道路が閉鎖になる。訪問の 1 週間前は道路閉鎖されていたが、訪問予定日は幸い好天に恵まれ無事に到着し、帰路は雪が消えていた。冬の晴天率は比較的高いが、夏の晴天率は低いとのことである。中国国家天文台（NAOC）の資料によれば、LAMOST は北緯 40 度 23 分 36 秒、東経 117 度 34 分 30 秒、高度 960m に位置している。

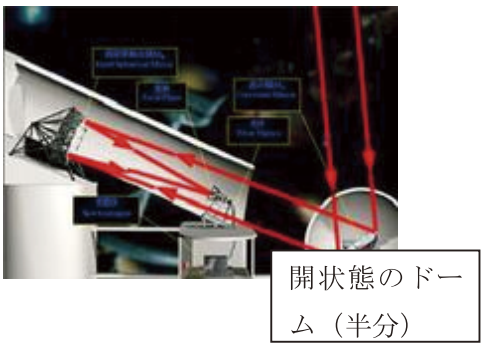
（5）建物構成

LAMOST の建物は 3 つに分かれている。外部から光を取り込む補正鏡がある M_A 棟、焦点面・分光器・データ処理用計算機などがある中央棟、球面主鏡のある M_B 棟である。

写真 9－2　建物外観と内部構造



© 秦　舟



出典：NAOC 資料より

丸いドームがある写真右側の建物 M_A 棟には補正鏡があり、建物の 1 階には LAMOST の概要を説明する資料が掲出されていた。この建物のエレベータで 4 階まで上がり、階段で 2 フロア上がった 6 階相当の高さのところに M_A がある。中央の建物（焦点面や分光器がある）との連絡通路は 5 階の位置にあり、左側の M_B 棟につながっている。中央棟はエレベータで 8 階まで上がったところに焦点面が設置されている。この建物の 1 階にも観測結果などの説明パネルがあった。M_B の建物には入れなかった。中央棟の焦点面から M_B までは、長い通路で取り囲み、百葉窓を設けて M_A への風の影響を低減し、光路の温度を均一にし、自然の大気視界の悪化を避けている。

補正鏡 M_A を保護するドームは半球の冠状で、東側と西側の半分ずつに分割されている。建物の両側に設けられた骨組みの最上部を移動することによってドームがオープンされ、

補正鏡 M_A が露出されて観測可能となる。

写真 9－3　スライド式ドーム（西側より）

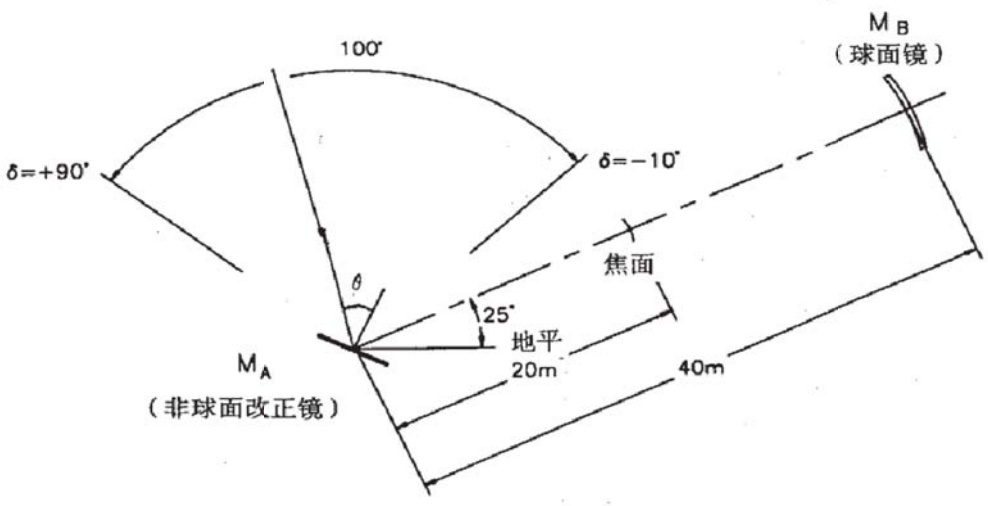
© 秦　舟

3. 鏡面等の構成

（1）光学系

LAMOST の光学系の構成は、図 9－1 に示すように 3 つのサブシステムが組み合わされている。左側（北側）の補正鏡 M_A は、天空からの微かな光を取り込む非球面の反射鏡である。M_A の台座は軸周りに上下左右に回転でき、100 度の範囲で天空の任意の方向に向けることができる。右側（南側）の主鏡 M_B は、M_A からの光を焦点面に反射させる球面鏡である。焦点面は、4000 本の光ファイバで最大 4000 個の恒星に位置合わせをして集光し、分光器でスペクトル情報に変換している。

図 9－1　LAMOST 光学系の構成

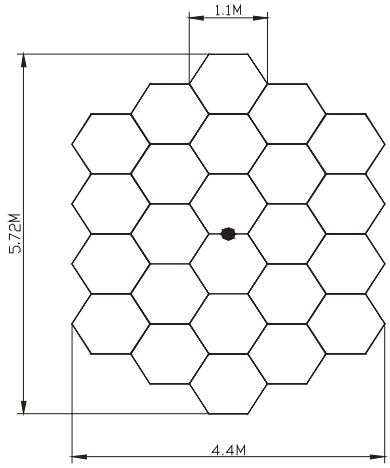


出典：NAOC 資料より

（2）反射式シュミット補正鏡（MA）

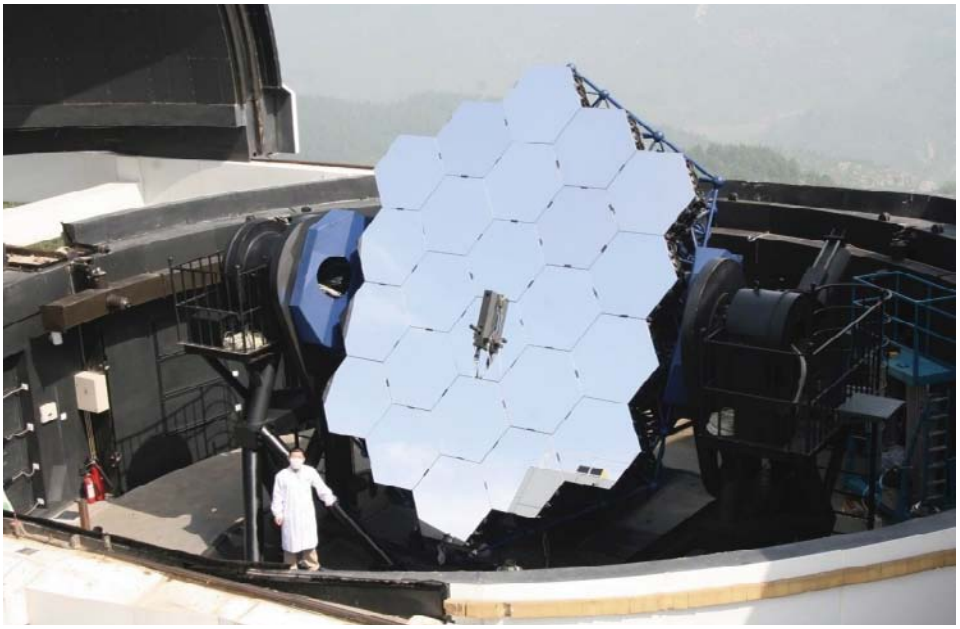
MA 棟のドーム内に設置されている反射式シュミット補正鏡 MA は、図 9－2 のように 24 枚の六角形の平面子鏡（対角線 1.1m）をモザイク接合して 5.72m × 4.4m の鏡面を構成している。各子鏡はステップモータにより能動的に支持される構造であり、全体を軸周りに方位方向及び仰角方向に回転させることができる。正面から見ると楕円形のような細長い形状であるが、斜め方向からは実効的に口径 4m の円形の反射鏡に見える。

図 9－2　24 枚の子鏡で構成される MA



出典：NAOC 資料より

写真 9－4　補正鏡 MA の外観



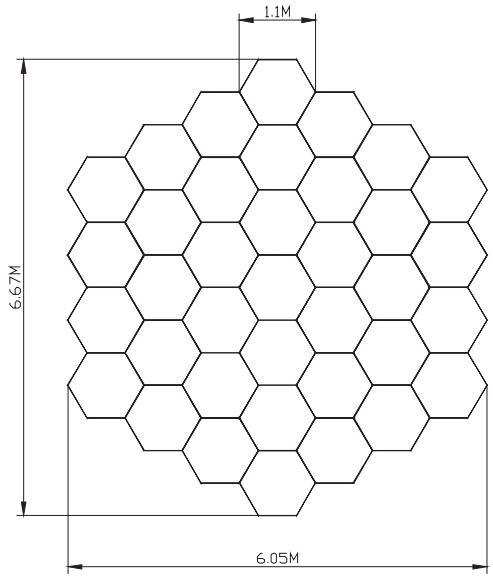
出典：NAOC 資料より

（3）球面主鏡（MB）

37 枚の球面子鏡（対角線 1.1m）を図 9－3 のようにモザイク接合して 6.67m × 6.05m の球面主鏡を構成している。

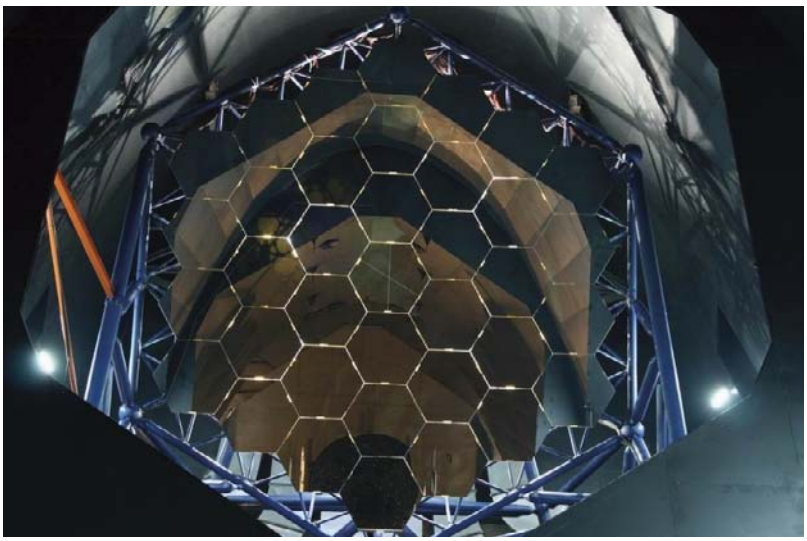
南側の高いドームに固定されており、反射シュミット補正鏡（MA）からの光を焦点面に反射させる。鏡の研磨はロシア企業が実施した。

図 9－3　37 枚の子鏡で構成される MB



出典：NAOC 資料より

写真 9－5　球面主鏡 MB の外観



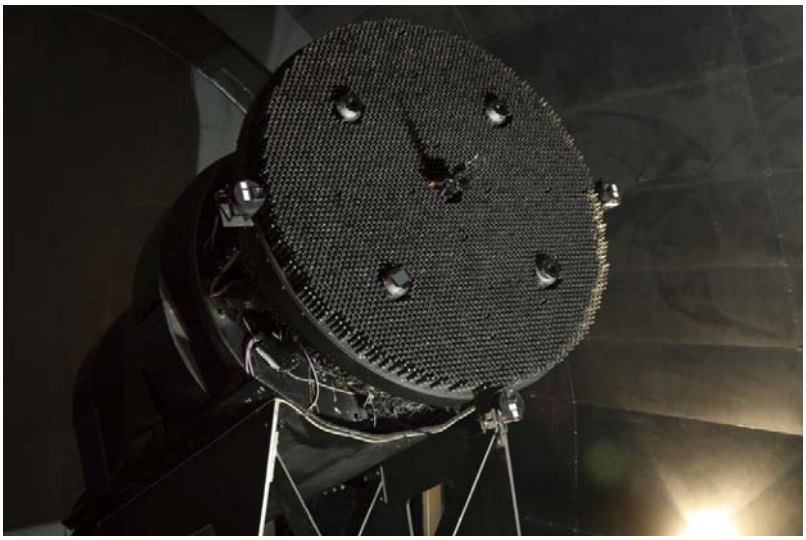
出典：NAOC 資料より

（4）焦点面

外部からの光は、MA、MB を通り中央の建物にある焦点面に集められる。そこに置かれた直径 1.75m のテーブルの上に、4000 本の光ファイバが配置されており、焦点面の光を分光器でスペクトルデータに変換する。光ファイバ 1 本あたり 2 個のモータが組み込まれた位置決めユニットを、直径 33mm の範囲内で動かすことができる（デュアルロータリー式）。米国の同種システムは、穴あきアルミ板を観測の都度に交換するという方式をとっており、最大 640 個の同時観測が世界最高記録であったが、LAMOST は試験期間中

に 1000 個を達成してこの記録を更新した。作業効率でみると、LAMOST は米国のものと比して 10 倍から 15 倍になる。

写真 9－6　焦点面



出典：NAOC 資料より

4. 観測ミッション

LAMOST は、数年間で全天サーベイを行って、1000 万個の恒星と 1000 万個の銀河のスペクトルを取得することを目標としている。そのような観測を行う目的は、次の 3 つである。

（1）ミッション 1：銀河の赤方偏移の全天サーベイ及び物理的特性の研究

銀河物理は、現在国際天文コミュニティでかなりホットな話題となっており、宇宙の誕生、銀河の形成及び恒星と銀河系の構造など先端的な問題は、すべて銀河物理の研究基礎の上に立てられている。銀河のスペクトルを取得することで、銀河の赤方偏移を得ることができ、赤方偏移が分かれば地球からの距離を知ることができ、距離と方向が分かれば恒星の三次元分布が分かり、このようにして宇宙の構造全体を理解できるようになる。同時に、銀河の形成や宇宙の大規模構造及び銀河物理を含む宇宙の進化を研究することができる。宇宙の大規模構造の研究は、銀河の赤方偏移を全天にわたってサーベイする作業に依存している。

LAMOST の目標は、1000 万の銀河、100 万のクエーサー（準恒星状天体、強い電波を出す非常に遠くにある小型の天体）、1000 万の恒星のスペクトルを観測することである。米国の SDSS 計画で観測する銀河やクエーサーの数に比べて LAMOST の観測数が数十倍多いことから、LAMOST はより高い精度で宇宙の組成と構造を決定する方式となることが予想され、ダークエネルギーと暗黒物質について、より深い認識を持てるようになる。

（2）ミッション 2：恒星と銀河の構造の特徴の研究

主に暗い恒星について、観測数を多くすることで銀河系のより遠くの恒星の分布や運動

状況を理解することができ、銀河の構造を理解することができる。LAMOST は大量の恒星のサンプルを処理できるので、もっと多くの観測対象の選択ができ、広い範囲からのより暗い星の研究を行うことができる。恒星は、多数の銀河の重要な構成部分である。1 つの恒星のスペクトルを通して、天文学者は、その密度、温度などの物理条件を分析することができ、その元素組成や含有量を分析することができ、さらにその運動速度や運行軌跡などを測定できる。異なる種類の恒星の分布を研究することで、銀河系の構造や銀河系の形成を研究することができる。

（3）ミッション３：可視光以外で発見された天体のクロス認証

天文学コミュニティの慣例では、電波・赤外線・X 線・ガンマ線など可視光以外の帯域で発見された天体は分光スペクトル分析を行う必要がある。分光スペクトル理論は十分で、経験も多く、他の手段で収集した天体の資料は、最終的に分光スペクトルで確認する必要がある。スペクトル取得率が最高の天文望遠鏡として、LAMOST の光学天文学における意義は自明である。クロス認証とは、たとえば X 線望遠鏡で得られた天体資料を可視光で確認することである。このような連携を通じて、天文学に関する多くの先端的な問題を解決する上で大きな役割を果たすことができる。

5. 運用

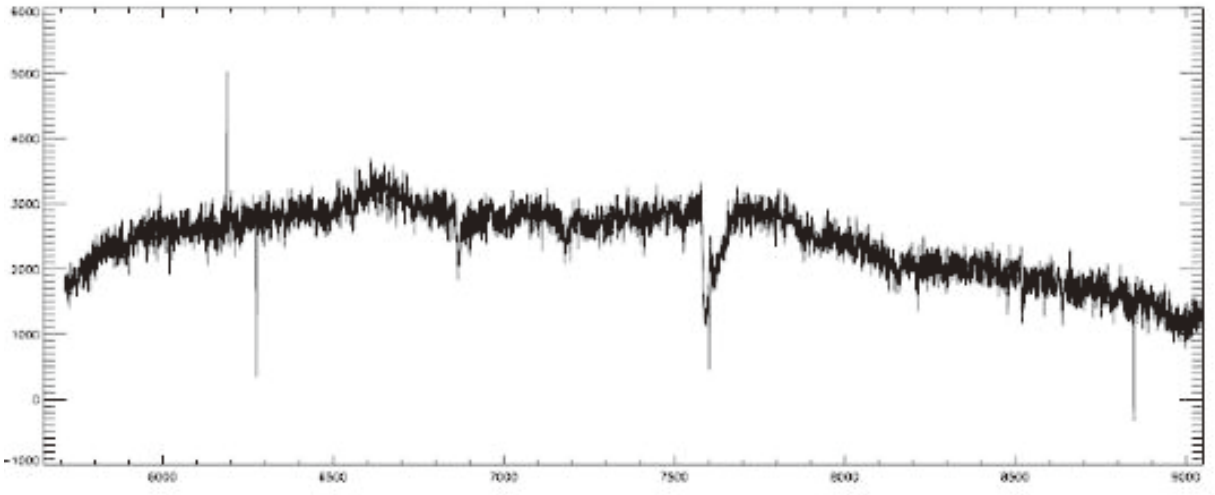
（1）観測手法

星表に基づいて視野角 5 度の範囲内で 4000 個の恒星を、同時に観測する。1 回の観測時間は 1 時間 30 分で前後に 30 分ずつ準備時間があり、冬だと一夜で 5 回の観測を行う。

（2）データ処理

集光された光は、分光器によりスペクトルに変換される。図 9－4 は LAMOST が初めて取得したスペクトルである。横軸は波長である。データ処理室は、この天文台の入口近くの管制棟内にある。制御卓は 2 列あり、前列に操作する技術者、後列に指示を出す科学者が座る。処理結果は、北京の国家天文台にも専用線で送られる。

図 9－4　LAMOST 望遠鏡が初めて取得した天体スペクトル



出典：NAOC 資料より

（3）現状及び今後の計画

・2009 年から 2011 年にかけての試験を経て、2011 年 10 月から正式に全天サーベイが開始された。これまでに、30 万個の恒星のスペクトルが取得できたとのことであった。5 年で 1000 万個の観測を行うには、1 カ月で 15 万個の観測を行う必要があり、これまでのペースはやや遅いといえる。

6. 他の望遠鏡との比較

LAMOST は中国が誇るユニークな光学望遠鏡であり、他の望遠鏡と直接比較することはできないので、LAMOST の特徴を 4 つに分けて他の望遠鏡と比較してみた。4 つの特徴とは、LAMOST の大口径・大視野角という仕様と、シュミット方式の光学系の採用、全天サーベイという観測目的である。詳細は以下に記すが、口径については世界最大ではないものの観測目的に適合した大きさを実現しており、焦点面に 4000 本の光ファイバーを配置することによる大視野角の同時観測も実現されている。また、シュミット補正鏡を用いた光学系設計は他に例を見ないものとなっている。観測目的を全天サーベイに置いたことは地味ではあるが天文学の発展に寄与すると期待される。米国の同種の望遠鏡よりも効率的に全天サーベイを行うことができ、比較的早い時期に科学成果が続々と得られるようになると予想される。

結論としては、今回の調査で LAMOST が世界的に見ても極めてユニークで科学的な意義を有する天文観測施設であることが確認されたと考える。LAMOST がどのような成果を出し、世界の天文学を引っ張っていけるかは、これからの運用にかかっている。

（1）「すばる望遠鏡」との対比～口径の大きさ

我が国で最大の口径を持つ望遠鏡は、ハワイに設置されている「すばる望遠鏡」である。口径は 8m であり、LAMOST が実質 4m なので大きさだけでいえば「すばる望遠鏡」の方が 4 倍の面積を持っている。しかも「すばる」はこの巨大な面積を 1 枚のガラス板で

製作している。LAMOST は鏡面を小さな面に分割し、モザイク接合している。なお、「すばる」の主鏡と LAMOST のシュミット補正鏡は、いずれもアクチュエータにより寸法的な調整を可能とする機構を採用している点が共通である。

両者の本質的な相違は、科学ミッションの目標設定にある。すなわち、「すばる」は天空の狭い区画を指向して分解能の高い画像を得ることを目的にしているのに対し、LAMOST は全天サーベイを効率よく行って恒星や銀河のスペクトルを取得することを目的としている。仮に「すばる」で LAMOST と同じ範囲の全天サーベイを行おうとすると、視野角が LAMOST の 10 分の 1 しかないことから、50 年とか 100 年といった単位で観測を続ける必要がある。しかし、「すばる」でそのような観測を行うこと自体が、本来の科学ミッションとは異なっている。

逆に、LAMOST が「すばる」のような画像取得ができるかというと、そのような設計にはなっていないので真似をすることは基本的にできない。

このように「すばる」と LAMOST は、全く比較対象とならない別の種類の望遠鏡であるといえる。望遠鏡のサイズだけをいえば LAMOST は半分くらいと小さいが、「スペクトル取得の効率」を取り上げれば、「すばる」をはるかに上回るものである。

(2)「スペースガード望遠鏡」との対比～視野角の大きさ

我が国で比較的大きな視野角を持つ光学望遠鏡としては、岡山県井原市美星町の「スペースガード望遠鏡」がある。財団法人日本宇宙フォーラムが文部科学省の補助金を受けて建設し、JAXA が毎年の運用経費を拠出し、NPO 法人日本スペースガード協会が実際の観測を行っている。

「スペースガード望遠鏡」は、主鏡の口径が 1m のカセグレン式望遠鏡で、視野角は 2.4 度と非常に大きく、このような光学系を設計し実現することはかなり困難であった。この望遠鏡は、基本的に静止軌道近辺の宇宙デブリ観測用として設計され、空き時間で地球近傍小惑星の観測も行っている。ソフトウェア的に静止軌道付近の飛行物体と小惑星を観測しており、ソフトウェアを取り換えれば全天サーベイを行うことも可能である。LAMOST が全天サーベイを行うために恒星 1 個に 1 本の光ファイバを割り当てているのに対し、スペースガード望遠鏡は CCD によって星の画像を一定時間おきに撮像して、恒星のデータを除去し、残った画像データからデブリや小惑星を判定している。このような目的であるため広い視野角とフォーク（望遠鏡の支持装置）の高速動作が必要になっている。

逆に LAMOST では、地球近傍を高速で移動する小惑星の追跡観測を同時に複数個行うことは不可能であり、スペースガード望遠鏡とは目的が全く異なるので、仕様等を比較しても意味はなく、大視野角の光学設計に苦労していることが共通点である。なお、「はやぶさ 2」のミッション（探査の対象とする小惑星）を決定するに当たり、スペクトルの違いで特徴づけられる各種のタイプの小惑星を比較検討したとのことである。

(3) 他のシュミット望遠鏡との対比

LAMOST は、シュミット望遠鏡の 1 種である。中国では「LAMOST 型望遠鏡」という分類名を提起し、シュミット望遠鏡とは一線を画そうとしているが、一応光学システムがシュミット望遠鏡の原理に則っていることから、我が国最大の国立天文台木曽観測所の

口径 1.05m のシュミット望遠鏡と比較してみる。

木曽観測所の望遠鏡は「補正板」が 1.05m で主鏡が 1.5m である。口径の大きさでは世界第 4 位になる。

LAMOST は補正板が 4m × 6m（実効的に 4m）、主鏡が約 6m である。世界最大のドイツのシュミット望遠鏡と比べて 3 倍（面積で 10 倍）の大きさとなり、圧倒的な大きさである。観測目的については「すばる」と同様、観測したい方向に向けて指向観測を行うための望遠鏡なので、LAMOST のユニークな観測ミッションに追いつくことは「すばる」よりも困難である。

なお、既存の光学望遠鏡では鏡筒がフォークで支えられて観測方向を変えているが、LAMOST はシュミット補正鏡の角度（上下・左右）を調節して観測方向を変えているところが大きな相違点である。

（4）赤外線天文観測衛星「あかり」との対比～全天サーベイ

LAMOST の科学ミッションに比較的近いのは、我が国の場合地上の天文台ではなく、全天サーベイをミッションとする天文観測衛星である。我が国では赤外線観測衛星「あかり」が全天の 90% をサーベイした。また国際宇宙ステーションに搭載している MAXI も全天の X 線観測を行うものである。

LAMOST と比較すると、衛星の方が天球の南半分も見えるので有利である。またほとんど空気がない真空中であるため、地上の望遠鏡観測で妨げとなる大気や雲や周囲の光の影響がない。地上でいえば晴天率 100% でかつ 1 日 24 時間フルに観測可能である。衛星は 90 分で地球を 1 周回しつつ観測を行うため、LAMOST のように長時間同じ方向を見続けることはできない。また衛星の設計寿命が「あかり」では 3 年と短く、地上設備のようにメンテナンスして継続使用することができない（NASA のハッブル望遠鏡はスペースシャトルで数回保守を行っている）。冷却剤を用いた観測は「あかり」の場合 1.5 年しかできなかった。

さらに、開発費用で比べると、「あかり」のような比較的小型の衛星でも M-V ロケットの打上げ費も含め約 200 億円を要している。LAMOST は開発費が約 30 億円で、その他付帯工事等の費用を含めても 2 倍以内に収まると考えられる。宇宙望遠鏡は非常に高価であることと打上げ失敗などのリスクが伴うことが不利な点である。

赤外線で存在が確認できた星について、20.5 等級以上の明るさがあれば LAMOST でその方向に向けて観測すれば星表にない星のスペクトルを取得できる可能性がある。LAMOST の科学ミッションには可視光以外の波長で観測された星のクロス認証を行うことが含まれており、クロス認証が成功すれば衛星と地上の補完関係が成立する。

双方にメリット･デメリットがあるが、基本的には LAMOST が可視光での観測であり、我が国の天文衛星が赤外線や X 線での観測であることから、性能比較を行うよりも補完関係を活用することの方が重要である。

7. 今後の日中協力

LAMOST を利用して研究を行っている国は今のところ米国とドイツなどであるが、日本は国立天文台がマンパワー不足のため、研究協力していないようである。しかし中国側

は、日本も含めて外国研究者を広く受け入れることを表明している。LAMOST を活用するには、現地に常時滞在する必要はないことから、科学目的の観測に日本人が参加することの意味は十分にあると思われる。

もし日本の国立天文台が参加できないのであれば、公立天文台の学芸員や民間の天文愛好家の中から LAMOST を活用した天文観測を希望する者を対象として、出張費（1 度くらいは現地を訪問すべき）や報告書の原稿料（中国の研究員も成果主義で給与が増えるとのこと）など必要な補助金を支出することにより、これまで考えられなかった天文観測研究の大衆化を実現できる可能性がある。これは別に国立天文台など専門研究機関に対抗する組織を作る活動ではなく、より高度な研究を行っている専門研究機関の人材レベルの底上げを助けることにもなる。

宇宙、海洋、航空、原子力、交通などこれまである権威の中で閉鎖的に実施されてきた科学技術活動を広く国民に開放し、専門家も一般国民との競争に晒される（囲碁将棋で言えばプロアマ戦のような）状態を作り出すことで、専門研究機関を活性化することにつながるという明るい展望が描けるであろう。このような成果に基づく国際交流が真の意味で我が国の科学技術力に対する評価を高めるものと考える。

8. 参考文献等

中国科学院国家天文台のホームページ
郭守敬望遠鏡運行和発展中心のホームページ
『LAMOST の現状』自然科学研究機構　国立天文台　野口邦男教授　2006 年
『王綬琯：LAMOST 之旅』中国科技奨励 2007 年 9 期
『LAMOST 的总设计师之一—记著名天文学家苏定强院士』中国科技奨励 2007 年 9 期

第十章　放射光施設「SSRF」

科学技術振興機構　研究開発戦略センター
フェロー（海外動向ユニット）
岡　山　純　子

1．放射光施設の意義

ナノテクノロジーやライフサイエンスなどの先端分野では、従来の探索的研究に代わって、物質の構造を原子・分子レベルで設計し、より効率的に目的とする機能を持つ新材料や医薬品の開発を行う方法が志向されるようになってきている。これはひとえに、物質を原子・分子レベルで分析する手段が発展したお陰である。この重要な手段の一つが放射光施設である。

一般に普及しているX線分析装置では、タンパク質のように複雑な構造を有する物質や微量成分の検出には限界があった。そこで、極めて輝度の高いX線を利用し、分析性能を大幅に高めた放射光施設に期待が集まり、世界各国で施設整備が進められている。例えば、インフルエンザ特効薬のタミフルは、放射光施設を活用した成果として有名である。

なお、現在普及している放射光施設においては、物質の構造解析の実施にあたり、観測対象が「結晶化」していることが前提となる。このため、一部のタンパク質等、結晶化できない物質の構造解析は行えない。そこで次世代の施設として期待されているのが、X線自由電子レーザー（XFEL）である。XFELとは、自由電子（原子核に拘束されていない電子）を媒質として発振するX線波長のレーザー光のことである。日本では、SPring-8に隣接する形で、世界最先端のXFEL施設であるSACLAが建設され、稼働している。

2．中国の放射光施設

現在、中国全土3か所に放射光施設があるが、いずれも中国科学院管轄の機関に設置されている。施設の概要は以下の通りであるが、上海市にある上海光源（Shanghai Synchrotron Radiation Facility、以下「SSRF」と略す）が最も新しく、波長の短いX線域の光源が求められるナノテク等の分野での実用に十分に耐える、世界的にみてもトップレベルに入る施設といえる。

今後の計画として、北京高エネルギー物理研究所に5GeVの第3世代放射光施設を建設する計画が検討されている。（北京・高エネルギー物理研究所及び上海光源へのインタビューより）

また、SSRFのある中国科学院上海応用物理研究所には、次世代光源であるXFELのテストサイトも設置されており、今年6月に着工予定となっている。XFELの研究は北京高エネルギー物理研究所でも実施されてきたが、上述の新規放射光施設の計画進捗に伴い、XFEL研究は全て上海に移管されることとなる。

表 10－1　中国の放射光施設とその概要

装置名称	設置機関（所在地）	加速エネルギー	設立年	改造等	特徴
「北京電子陽電子コライダー（BPEC）Ⅱ」の一部を「北京シンクロトロン放射光施設（BSRF）」として利用	中国科学院高エネルギー物理研究所（北京市）	2.5GeV	1988 年	2004-2009 年の改造で BPEC Ⅱとなる	高エネルギー物理の施設を間借りして放射光施設として使用しているので、マシンタイムが少ない等の問題がある。（第 1 世代放射光施設）
中国科学技術大学・微小物質国家実験室（NSRL）	中国科学技術大学（安徽省・合肥市）	0.8GeV	1991 年	1994-2004 年 第 2 期工事	ビームエネルギーが低いため、光源の供給波長域に限界があると同時に、輝度が低いため解析能力が他の施設と比較して相対的に低い。（第 2 世代放射光施設）
SSRF	中国科学院上海応用物理研究所（上海市）	3.5GeV	2009 年	現在、第 2 期工事中	中国最新鋭の放射光施設（第 3 世代放射光施設）

出典：各研究所ホームページをもとに作成

3. SSRF 視察

今回の訪問では、第 3 世代放射光施設に位置づけられる SSRF の視察を行った。また、SSRF に焦点を当てつつも、XFEL への取り組み状況についても聞き取りを行った。本章ではその結果を記す。

（1）訪問の概要

①日時：2012 年 3 月 1 日（木） 13：30 ー 17：30

②訪問場所：中国　上海市　浦東張江張衡路 239

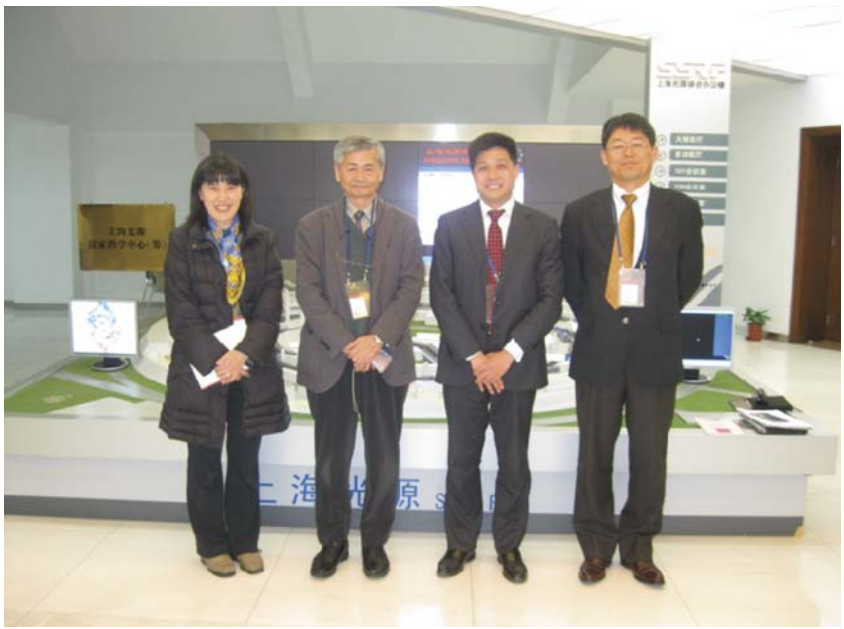
③日本側訪問者：

岡山純子　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　フェロー
北村英男　理化学研究所播磨研究所 放射光科学総合研究センター
加速器研究開発グループ　上級研究員
森　英郎　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　フェロー
単　谷　　科学技術振興機構　中国総合研究センター　フェロー

④中国側対応者：

Heping Yan 教授　Deputy Director of SSRF Project Office, SIAP, CAS
Renzhong Tai 教授　Deputy Director of SSRF Phase Ⅱ Project,
Director of Department of Physics & Environmental Science, SSRF, SIAP, CAS
何　建華教授 副総経理、国家タンパク質研究施設

写真 10－1　SSRF 模型の前で（日本側訪問者のみ）
左から　岡山、北村、単、森



© 岡山純子

（2）立地経緯

SSRF は中国最大の放射光施設である。中国の一大バイオ拠点でもある上海・張江ハイテクパーク内に立地しており、浦東国際空港からも車で 30 分程度の距離にある。研究所側は、世界で一番交通アクセスの良い放射光施設としている。また、胡錦濤国家主席をはじめ多くの要人が訪れており、国家としても重視している施設とのことである。

放射光施設は極めて精密な装置であるため、地盤が固い地域に立地することが望まれる。一方、上海は極めて地盤の弱い土地であるため、一般論からすると放射光施設の立地には不適な地域といえる。しかし、上海市政府が資金提供するなど誘致に積極的であったこと等から、上海に立地することとなった。

このため SSRF では、柔らかい地盤の上で装置が振動しないように安定させるフィードバック設備を導入し、60cm × 48m の杭を 2100 本打ちこんでいる。この結果、振動を 200nm レベルにおさえられているとのことである。

日本の専門家によると、放射光施設であれば、このレベルの振動は問題にならないが、今後 XFEL を建設するとなると、装置の精度に大きく影響する懸念があると指摘している。

（3）建設経緯

SSRF は 2004 年に正式着工となるが、そもそもは 1995 年に中国科学院と上海市政府が、施設整備についての共同提案を行ったところから検討が始まっており、その後 10 年ほどの R&D プロセスを経て着工している。この検討過程は、①検討着手（1995-06 年）、②R&D1（1999-2002 年）、③ R&D2（2003-04 年）、④最終案（2004 年 -）の 4 段階に分かれる。

日本の専門家によると、②のフェーズまではウィグラーを挿入光源として使用した第 2

世代型放射光施設に分類される施設にすぎなかった。しかし、国際アドバイザリー委員会の委員を務めた日本の専門家が、「このままではこの施設は稼働開始時には既に陳腐なものとなってしまう。最新鋭技術である真空封止アンジュレータを導入して、高輝度なX線領域の波長に対応すべき」と発言した。SSRFは、この日本の委員の指摘を踏まえ、真空封止アンジュレータを導入すると同時に、併せて加速器の設計を全面的に見直し、蓄積リングの周長を1.5倍程度に拡大する等、大幅変更を行った。その結果、③のフェーズ以降は、第3世代放射光施設を前提とした設計となった。この変更がなければ、たんぱく質の構造解析をSSRFで行うのは困難であったとのことである。

以降、以下の通りのスケジュールにて施設整備が進み、2009年には一般ユーザーへの公開が始まっている。

・2004年12月25日　正式着工
・2007年12月24日　初の放射光ビーム発生
・2009年5月　一般ユーザーに公開
・2010年1月19日　国の検収に合格（本格的に供用開始）

（4）建設コスト

SSRFの建設費の当初予算は12億元であり、上海市、中国科学院および中央政府が1/3ずつにあたる4億元を負担した。ただし、上海市が外観にこだわり予算オーバとなったため、実際には14.344億元（≒200億円）かかった。超過分は上海市が負担したため、最終的に上海市の負担額は6.344億元となった。また、土地は上海市政府が提供している。

ちなみに、施設のスペックが大きく異なるので単純比較はできないが、日本のSPring-8の当初建設費は1100億円であり、用地は兵庫県が出資している。

（5）部品の国産化

中国では、大型施設を建設する際に部品の国産化を目指すことが一般的であり、SSRFも同様である。SSRFのパーツの国産化率は7割となっており、国産化に成功したパーツには、電源、分光器、超高真空装置、crystal bend、真空封止アンジュレータ等がある。

また、自主開発したEPU（楕円偏光アンジュレータ）装置は、韓国の放射光施設PALにも導入されているとのことであった。これら部品の設計はSSRFが行い、真空ダクト、ビームライン等の加工は企業に委託している。

国産化できていない3割の部品は、Super conduction Cavity（独から購入）、冷却材（日本のKEKに依頼）等である。SSRFは、「時間が十分にあれば国内でも対応可能なのだが、時間に制約があるため海外から導入している」としている。

（6）外観・構成

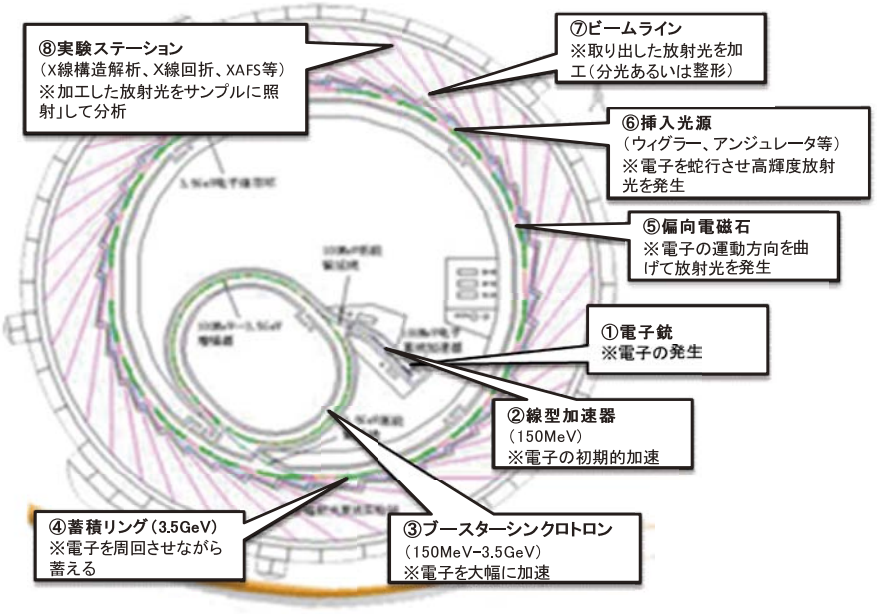
SSRFのデザインは、生命研究を意識した螺旋形のデザインとなっている。上海・張江ハイテクパーク内に位置し、SSRFの他にもNMRや電子顕微鏡などの分析装置を備えた拠点も近隣にあり、極めて利便性が高い立地である。

写真 10－2　SSRF の航空写真

出典：SSRF 提供資料

SSRF の大まかな仕組みを図 10－1 で解説すると、①電子銃で発生した電子を、②線形加速器で初期的に加速し、③ブースター・シンクロトロンでこれを大幅に加速する。加速した電子を④蓄積リングに蓄え、放射光を利用する際に⑤偏向電磁石（リングの主要構成）や⑥挿入光源（ウィグラー、アンジュレータ等）から放射光を取り出す。これを⑦ビームラインに導き、設置した各種の光学機器で放射光を加工（分光あるいは整形）し、⑧実験ステーションにあるサンプルに照射し、必要なデータを取得する。これは、主要先進国に設置されている放射光施設と同じ構成である。

図 10－1　SSRF 施設内部の構成
（文章で説明にある番号と図の番号は一致している）



出典：SSRF の資料をもとに北村英男上級研究員および岡山純子作成

写真 10－3 は、SSRF 唯一の構造生物学専用のビームラインである。写真（左）の中央手前（人がいるところ）が、⑧実験ステーション、その奥の覆われた中にサンプルが置かれた観測点、さらに奥は光学機器が設置されている⑦ビームラインとなっている。わかりにくいが、右上に見える壁の内側に⑥挿入光源や④蓄積リングがある。

なお、この構造生物学専用ビームライン（BL17U、真空封止アンジュレーター型）においては、共用開始から 2 年半で、約 150 グループが使用した。このビームラインだけで 100 報以上の論文の生産に貢献しており、このうち Nature 誌 5 報（うち 4 報が清華大学のグループ）、Science 誌 1 報（清華大学グループ）、Cell 誌 1 報（清華大学グループ）、Cancer Cell 誌 1 報（復旦大学グループ）と、超一流誌に 8 報の論文が掲載されたとのことである。

写真 10－3　SSRF の構造生物学専用ビームライン
左：実験ステーション　右：観測点

© 岡山純子

© 岡山純子

（7）利用状況

SSRF に対するユーザのニーズは高く、現在申請に対する採択率は 3 倍程度である。2010 年の稼働開始から 2011 年 5 月末までの利用実績は以下の通りである。

①分野：構造生物学 26%、材料 20%、化学 12%、ライフ 10%

②機関：大学 47%、研究機関 38%、病院（大学病院含む）8%、企業 7%

③企業ユーザ：国内・国外企業ともにある。分野も色々だが、張江ハイテクパークに入っているような製薬・化粧品会社が多い。ただし、研究目的の施設なので、企業の利用率は 10%以内におさまるよう制限している。

④国外ユーザ：韓国が多く（8 件）、シンガポール 3、オーストラリア 1、台湾 1 など。なお、2011 年 5 月以降、東日本大震災の影響で放射光施設が使えなくなった日本の機関も（KEK 等）4 件の利用があった。

⑤利用料：実験結果を公開するなら無料、企業が結果を秘密にする形で利用するなら 1 時間 2000 元（≒ 26000 円）としている。これは、SPring-8 とほぼ同様の形態である。

4. 世界主要拠点との比較

2009 年 11 月 29 日の中国・新華網の報道によると、SSRF は世界 3 大放射光施設である ESRF（仏・グルノーブル）、APS（米・アルゴンヌ）、SPring-8（日・播磨）に次ぐ世界 4 位の放射光施設とのことである。これは、電子の加速エネルギーの大きさで評価したものと思われる。

これら 4 施設のスペックを次表にて比較する。SSRF は、エネルギーは 3.5GeV と他の 3 大拠点と比較して小さいが、先に述べたとおり真空封止アンジュレータを使用した第 3 世代プラスの技術を採用しているため、硬 X 線領域に至るまでの放射光が得られる施設であり、研究利用を行う上では主要国の施設と比較して遜色ないものとなっている。

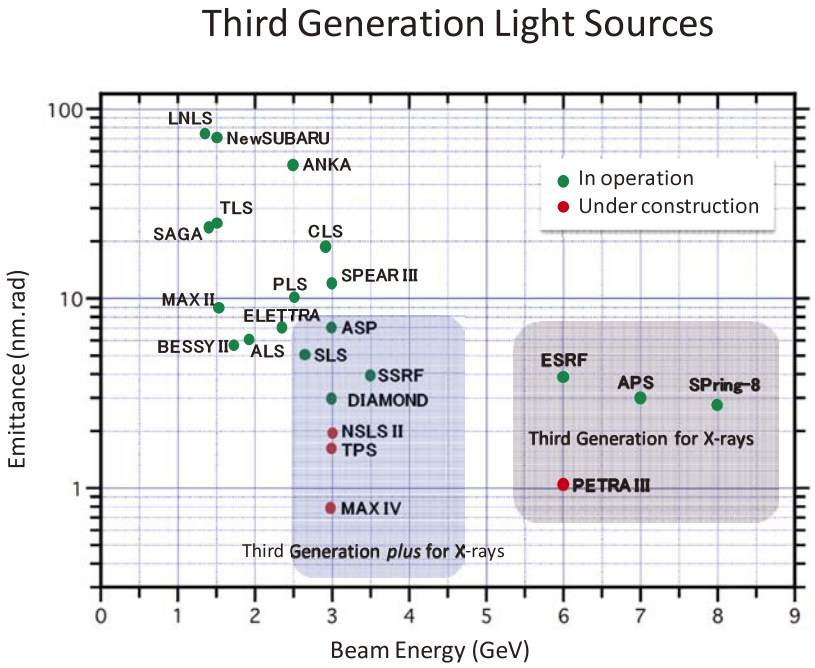
表 10－2　世界の第 3 世代放射光施設・主要拠点との比較

施設名称	SPring-8	APS Advanced Photon Source	ESRF European Synchrotron Radiation Facility	SSRF（上海光源）
設置者 設置場所	原研・理研 / 播磨科学公園都市	米国エネルギー省 / アルゴンヌ（米）	ヨーロッパ 18 カ国 / グルノーブル（仏）	中国科学院応用物理研究所 / 上海光源
加速エネルギー	8（GeV）	7（GeV）	6（GeV）	3.5（GeV）
ビームライン	62 本	68 本	56 本	7 本（第 1 期） （最大 60 本）
蓄積リング周長	1436m	1104m	844m	432m
供用開始年	1997 年	1996 年	1994 年	2010 年

出典：理化学研究所ホームページ等をもとに作成

放射光施設の性能は、大ざっぱにいうと電子の加速エネルギー（エネルギーが高いほど構造解析に重要な X 線領域の光を発生するので良い）と蓄積リングの性能（エミッタンスが低いほど放射光の輝度が高い）に依存している。そこで、世界の主要な第三世代放射光施設のエネルギーとエミッタンスを 2 軸にプロットした図を以下に示す。図の右下に行くほど、施設の性能が良い（観測精度が高い）ことになる。これでみると、SSRF は世界 3 大放射光施設に次ぐ施設であるとの新華網の報道はいささか誇張であり、英・DIAMOND 等とならんで第 2 位グループに SSRF が入っているといえる。

図 10－2　世界の主要第 3 世代放射光施設の比較



出典：理化学研究所・北村英男上級研究員提供資料

なお、前述の通り SSRF とは別に、今後北京において 5GeV の放射光施設を建設することが検討されているので、これが実現すれば、当該施設が中国最大規模のものとなり、世界的にみてもトップ拠点の一角をなすこととなる可能性がある。

5. 科学技術上の評価

SSRF は、海外技術に依存しながらもナノテク・バイオ分野での研究利用に十分耐える施設である。一方、後述する間引き運転、トップアップモードなどが可能となる、より完成度の高い施設とするには、まだまだな点がある。しかし、「大方のユーザの利用に耐えれば良い」との観点に立てば、欧米主要国の施設と比較して遜色ない。以下、個別技術について、日本の専門家にインタビューした結果を記す。

（1）光源

SSRF は、3GeV 前後の放射光施設でありながら、真空封止アンジュレータを導入し、硬 X 線領域の波長の光を放出することができる施設である。同程度のスペックの施設としては英・ダイアモンド、仏・ソレイユ等があるが、光源そのものはこれら施設と比較して遜色ない。

（2）蓄積リング

一般的な結晶構造分析を行う上で特に問題はないものの、物質の光応答についての分析

を容易にする「間引き運転[4]」や、光学系施設の精度を維持する上で重要な「トップアップモード[5]」といった多様な運転モードが実現できていない。この点においてSPring-8や主要国の同等の施設と比較して劣る。

（3）利用面

一般の放射光施設の利用ニーズは、硬X線を用いた構造解析やX線散乱と、軟X線を用いた基礎的な物質研究等とがある。発展途上国では、予算規模や技術水準の制約により、硬X線が得られず軟X線までしか利用できない小型の放射光施設しかつくれないことが多い。このため小型の放射光施設を利用しようにも、途上国にはアカデミックな基盤がないというジレンマがある。

中国における放射光施設についても、硬X線での分析ができるかどうかが最大のポイントとなるわけだが、上海光源は先に述べた通り真空封止アンジュレータを導入したことにより、硬X線領域での分析が可能となっているので、産業応用を含めた広いユーザ層のニーズに対応可能な水準の施設となっている。

強いて言えば、間引き運転ができないため、物質の光応答に関する動的分析については不十分であるが、この利用ニーズは稀であるため大きな問題にはならない。

（4）X線自由電子レーザー（XFEL）への展開

現在、上海のテストサイトで実施されているXFELはHGHG（High Gain Harmonic Generation）方式である。この方式では、軟X線領域では可能であるが、硬X線領域では難しい。

また、今年6月から着工する軟X線FELについては、どの方式を取るか検討中とのことである。現状から考えて、日本のSACLA（SASE（Self Amplified Spontaneous Emission）方式を採用）と同クラスのXFELを実現するまでに、少なくとも10年はかかるとの印象を持った。

6. 中国の科学技術政策関係者のコメント

中国における放射光施設の意義について、中国の科学技術政策関係者にインタビューし、以下の通りのコメントを得た。

中国科学院の研究所は、研究分野にもよるが、大まかに言って1/3が中国科学院本部からの資金、1/3が国の競争的資金、1/3が地方政府や企業からの委託契約で運営されている。

過去において、中国では鄧小平が高エネルギー物理を重視する中、施設整備がすすめられたという事実はある。しかし現在の中国には貧しい地域もあり、まだまだ経済的にも発展途上にある。それに対応するのが最優先課題であって、高エネルギー物理に大々的に取

[4] 物質に光をあてると構造や性質が変化し、これが元の状態に戻るまでの間に時間（＝緩和時間）がかかる。一方、蓄積リングでは電子が高周波で加速されるため、多数の群れを形成する。放射光はこの電子群から得られるので、時間間隔がnsオーダーのパルス光となる。したがって、このままでは緩和時間の長い現象には対応できない。これを解決するために、いくつかの電子群を間引いてパルス間隔を長くする運転モードが採用される。

[5] 放射光の強度は蓄積リング内の電子ビーム強度に比例する。蓄積リングのビーム強度は、蓄積終了後は緩やかに減衰していく。当然ながら放射光強度も減衰していく。放射光強度が変化すると光学素子（反射ミラー）の熱負荷が変化し、結果として光学機器にゆがみが生じるなど、精度が維持できなくなってしまうことがある。これを解決する蓄積リングの運転モードが、電子を常時補給し、蓄積リングの電子ビーム強度を一定に保つトップアップモードである。

り組む余裕はない。放射光施設も研究目的の施設であり、中国は他に優先すべき課題があると思われる。

北京の将来の放射光施設建設計画については、上海光源の建設にかかわった技術者の技術の継承のために仕事を続けさせることが目的との印象を持っている。この施設整備は、いまだ検討中の事項と認識している。今後国家発展・改革委員会から発表される予定である大型施設に関する第 12 次 5 カ年計画を確認して、そこに記載されていれば実施されるし、記載されていなければ国の資金は出ない可能性が高い。

7. 施設の将来性および課題

上海光源では、今後第Ⅱ期、第Ⅲ期でビームラインを建設し、現在の 7 本から 2020 年過ぎに 60 本まで拡充する予定である。また、XFEL 施設についても、軟 XFEL 施設から徐々にエネルギーの高い硬 XFEL 施設の建設も進める。これらは、科学技術部が策定した「科学研究基盤発展第 12 次 5 カ年計画」（2011-15 年）にも明記されている。

これらの将来性および課題について、以下にそれぞれ記載する。

（1）放射光施設

①今後の計画

上海光源では現在、施設運営を行いつつ第Ⅱ期建設も進めている。第Ⅱ期の総予算は 16.8 億元である。ここでは、24 本のビームラインが新設される。加えて、特定の組織・団体が独占的に保有する専用ビームラインも追加される。我々が訪問した際には、中国最大の石油会社 SINOPEC が専用ビームライン敷設検討のため、視察に訪れていた。

今後の施設整備の基本方針は以下の通りである。

・あらゆる分析が可能となるよう、赤外ーγ線までの光をカバーできるようにする。このための、マシン・加速器のアップグレードを行う。
・ビームライン技術ラボとして、コンピュータセンター、X 線光学ラボ、精密機械ラボ、電子・ディテクターラボを設置する。
・ユーザーサポートラボを設置する。

現在建設中のビームラインには、材料の加工（10nm 周期での人工格子の加工等）を行うことを目指したものがある。これは、スイス光源（SLS）で初めて取り組まれたものであり、上海光源では世界で 2 番目に実現したいとの考えとのことである。また、極めて長いビームラインを建設することで照射視野が広い放射光を得る（大きな試料に対応可能となる）ための施設整備を進めることが計画されている。

②課題

一方、上海光源は現在、いくつかの課題を抱えていると思われる。まず施設のキャパシティであるが、当初の予想以上に利用者が多い。こんなにニーズがあるならば、最初からもう少し大きめのスペックの施設にしておくべきだったとのことであった。

一方で、ビームライン建設等の資金面で苦慮しているように感じた。先に述べた通り、中国科学院の研究所は、研究費を含む運営費の概ね 1/3 を自ら調達しなければならない。

おそらくはこの理由から、施設として注目されている割には、ビームライン増設のスピードが遅い感があった。

さらに、仮に北京でよりハイスペックな第 3 世代放射光施設が建設されることとなる場合、どのように差別化するのか等を考慮する必要が出てくる可能性がある。

（2）XFEL への展開

XFEL 施設整備のスケジュールは前述の通りであり、日本の専門家は、光源の方式もまだ決定していないため日本との格差は 10 年以上とコメントしている。軟 X 線 FEL 施設が本年（2012 年）着工予定である。この際にどの方式を採用するかが第一のポイントとなろう。

8. 今後の日中協力

日中の放射光施設における協力は、「日中拠点大学交流事業（2000-2009 年）」の「電子加速器に関する研究等」や、理研において「上海放射光施設におけるビームラインデザインのためのワークショップ」が開催されるなど、極めて活発であるといえる。

今回、中国側に対するインタビューでは、「放射光施設は SPring-8 が世界トップであり、SSRF の第Ⅱ期、第Ⅲ期の建設においても SPring-8 から学びたい。また、機器の R&D もあると思うが、ユーザサポートとサービスについても交流したい。」との回答を得ている。

第 3 世代までの放射光施設は、一定の産業技術力があれば施設整備が可能であり、この意味で各国間で施設の差別化を行うことは難しいのではないかと思われる。よって、利用面で中国から斬新なアイデアが出てこないか、協力を継続しながらその動向をモニタリングしておくことは日本にとっても意味があることといえよう。

一方、XFEL については状況が全く異なる。たとえ、日本の SACLA の完全なコピーをつくろうとしても、レーザーを生成し、観測対象に当てることは極めて難しいと理研の専門家は指摘する。

9. 参考文献等

渡辺誠・佐藤繁編『放射光科学入門』東北大学出版会
Jinhua Dai, Haixiao Deng and Zhimin Dai、“Proposal for an X-Ray Free Electron Laser Oscillator with Intermediate Energy Electron Beam”, PHYSICAL REVIEW LETTERS, 108, 034802（2012）.
中国科学技術部『科学研究基盤発展第 12 次 5 カ年計画（2011-15 年）』2011 年
理化学研究所播磨研究所・北村英男上級研究員提供資料
理化学研究所ホームページ
上海光源ホームページ
北京高エネルギー物理研究所ホームページ
中国科学技術大学微小物質国家実験室ホームページ
日本学術振興会ホームページ

第十一章　強磁場施設

科学技術振興機構　研究開発戦略センター
フェロー（ナノテクノロジー・材料ユニット）
島　津　博　基

1．世界の強磁場科学

（1）強磁場科学とは

強磁場科学とは、マグネット（磁石）を用いて物質に強磁場を印加することにより生じる種々の新たな現象を科学的に解明する学問である。物質に強い磁場を加えると、結晶そのものの構造が変わったり、普通には見られない物質の性質を引き出したり、物質の機能や状態を制御することができる。

強磁場の発生にはマグネット開発技術、大規模な電源（電力）及び冷却システム、これらに関する総合的なシステム設計技術等を擁した強磁場施設が必要となる。物質に印加する磁場が強ければ強いほど新規な現象を生じるため、より強い磁場を求めて強磁場を発生する技術やそれを用いた測定システムについて世界各国で激しい開発競争が行われてきた。

マグネットを破壊せずに発生できる磁場は理論的に 100T[6] が限界と言われており、この究極の強い磁場を瞬間的に発生する研究が世界の強磁場施設で実施されてきた。ちょうど本調査の時期である 2012 年 3 月米国のロスアラモス国立研究所は 100.75T の磁界を非破壊に生成することに成功したが、これは強磁場科学にとって画期的な出来事である。

一方、近年、超伝導マグネットも大きな発展を遂げ、市販の装置でも 20T に及ぶ磁場が比較的容易に得られようになった。さらに液体ヘリウムを必要としない伝導冷却型の超伝導マグネットが開発され、10T を超える強磁場を研究室レベルの室温空間において利用できることになってきている。多くの研究者が比較的容易に極限環境を扱えることになったことでこれまで不可能であった新しい試みが可能になった。その結果、新たな現象が見出されたという多くの報告がなされている。

（2）主な強磁場施設

現在、世界各国で建設運転されている磁場施設は、大別して 2 つに分かれる。定常磁場施設とパルス磁場施設である。定常磁場は時間に対して磁場が一定であるのに対し、パルス磁場は数 μ s ー数十 msec の時間幅を持つパルス状の磁場である。

定常磁場では、物質の時間変化を計測する際や信号を、時間的に積算する必要がある場合に特に有効である。例えば、物質に一定の磁場をかけながら温度や圧力などのパラメータを変化させて時間経過を観察することができる他、化学反応の時間変化や X 線、中性子を作用させた状態での挙動を計測できるのが強みである。

一方パルス磁場では、定常では得られない高い磁場領域の測定ができる点や、30T 級の強磁場であれば比較的簡易な設備で研究室単位で実験が行える点が強みである。磁場発生

[6] T［テスラ］は磁場の強さを表す単位である。1T=10^{4}G［ガウス］であり、地磁は 0.0001T 以下、冷蔵庫に貼ってあるマグネットは 0.1T、MRI に使われる磁場は通常 0.5T ～ 1.5T である。最近では 3T の強磁場装置が日本国内でも大規模病院を中心に普及が始まりつつある。

時の試料の発熱や電磁誘導（磁力の変化に応じた電気の発生）によるノイズのために、定常磁場に比して精度が多少劣化することは避けられないが、長時間パルスを用いれば比較的ノイズが少なく、特に超伝導体や電気抵抗の低い導体の研究等においては、定常磁場に遜色ないデータが得られる。

このように定常強磁場とパルス強磁場は相補的な役割を担っている。以下、両方の磁場装置の技術的な仕組みを簡単に述べる。

①定常磁場

定常磁場で用いられるマグネットとして、大電力水冷マグネット、超伝導マグネット、また 2 つを組み合わせたハイブリッドマグネットがある。

現時点で、強磁場下の物性実験によく用いられているのが超伝導マグネットである。超伝導マグネットは、磁石自身のジュール発熱がないので、磁場発生自身には電力をあまり要しない点が優れており、また極めて精密に制御できる。その一方、高速の磁場掃引は困難であること、また強磁場領域では大量の液体ヘリウムを必要とし、装置が大型化していること等の問題もある。超伝導マグネットの限界は、主に強磁場中で超伝導が破壊される事によって決まっており、30 T 級の超伝導磁石を作るためには、より高温超伝導材料の実用化の必要がある。

20 T より強い磁場を発生するのには、水冷マグネットが最もよく用いられる。水冷マグネットは、空芯の常伝導の磁石に大電流を流して、そこで発生する熱を冷却水で除くものである。磁場を発生するのに用いられる電力は全てジュール熱に変換されるので、大電力と大型水冷装置を必要とする。大体 30 T 級で 10-15 MW の電力が必要となる。40~50 T の定常磁場を構築しようとすると、20MW を超える電源、冷却水設備を整備する必要がある。世界的に省エネに対する意識の高まりの中、各施設とも安易な電力使用量増の選択は困難な状況である。

マグネットに加わる電磁力は磁石に流れる電流と自分が作る磁場の作用であるので、いくつかの磁石を同心円状に配置して、個々の磁石の電流を減らすことでこれを軽減するという考え方に基づいて作られているのがハイブリッド磁石である。ハイブリッド磁石においては、常伝導の水冷（銅）マグネットの外側に超伝導磁石を配置して、磁場を底上げすることで水冷マグネットの電磁力と発熱を軽減する。

②パルス磁場

パルス磁場は、コンデンサ等に蓄えた電荷（エネルギー）をコイルに瞬間的に放電することで、発熱（温度上昇）を抑えながら、極短時間ではあるが非常に強い磁場を得る方法である。このため大きなエネルギーが取り出せる電源が必要となる。

パルス磁場には、コイルが繰り返し使える非破壊型のパルス磁場発生方法と、コイルの破壊を許容して磁場を得る一巻きコイル法や電磁濃縮法といった方法がある。パルス磁場の利点は、発生時間が短いためにコイルの発熱が定常磁場に比べて格段に少ないことで、このため水冷マグネットでは困難な 40 T を超える磁場を、研究室レベルで容易に発生できる。発生磁場の最大値は、コンデンサに蓄えられるエネルギーによって制約される。実際の発生磁場はコイルの発熱による損失等によって減じ、パルス幅が長くなればなるほど損失が大きくなる。このため強い磁場を出すにはコイルの電気抵抗をいかに下げるかが重

要であり、通常液体窒素等に浸して用いる。現在の技術では、パルス磁場の限界は 100T 近傍にある。

100T 以上の超強磁場を発生させるためには、爆縮法、電磁濃縮法、一巻きコイル法等の破壊型磁場発生法が開発されている。これらの磁場発生時間はマイクロ秒程度で通常のパルス磁場より短いため、計測も難しいが、超強磁場でのみ現れる未知の現象を探索する先端的な研究が行われている。

2. 中国の強磁場科学

20T を超えるような強磁場の発生には、特有のノウハウや総合システム技術を要するため、これまでこのような強磁場施設をもつのは日米欧の 3 極に限られていた。

しかし中国では、近年の急速な科学技術の進展に伴い、強磁場科学への取組が本格化しつつある。強磁場下における物質の応答から電子構造に関する新しい知見が得られ、超強磁場下で出現する新物質相の発見により物質科学の新地平が切り開かれる。中国における強磁場科学への取組は、中国が従来弱いと言われていた学術的な基礎研究を推し進め、新しい物質科学を切り拓くことができる環境を整えつつあることを意味している。換言すると、国として総合的な国際競争力を発揮し、イノベーションの実現を可能にするという中国の意思・姿勢を表しているといえる。

具体的には、第十一次五カ年計画（2006 -2011 年）で推進すべき大型プロジェクトの 1 つに、「強磁場実験装置」プロジェクトが選定され、2008 年にスタートしている。そして、安徽省合肥市で定常強磁場施設が、湖北省武漢市でパルス強磁場施設が建設されている。いずれも 2013 年の最終的な完成を目指して開発が進められている。

そこで今回、強磁場施設について中国の動向を調査するとともに、国際的な状況と比較したので、これについて報告する。

3. 強磁場科学センター（定常磁場）視察

（1）訪問の概要

①訪問日時：2012 年 3 月 22 日
②訪問場所：安徽省合肥市
③日本側訪問者：
　島津博基　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　フェロー
　三浦　登　物質材料研究機構　若手国際研究センター センター長
　（東京大学名誉教授）
　趙　晋平　科学技術振興機構　中国研究センター　フェロー
④中国側対応者：
　Prof. Kuang Quangli（匡 光力）強磁場施設所長、物質科学院責任者
　Prof. Gao Bingjun（高 秉鈞）技術開発責任者

写真 11－1　強磁場科学センターにて
左より趙（日）、島津（日）、匡（中）、三浦（日）、高（中）

© 島津博基

（2）強磁場科学センターの概要

中国科学院合肥物質科学研究院と中国科学技術大学が、共同で安徽省合肥市に建設し、運営は中国科学院が行っている。当初目標は 20MW の電源を持ち、ハイブリッドマグネットで 40T の磁場を確立することであった。建設予算は 5 年間で 2.5 億元（建屋と設備費（1 元＝約 15 円））であり、年間の運営費（約 1300 万元）と人件費は、別途科学院から支給されている。

写真 11－2　強磁場科学センターの外観

出典：強磁場科学センターホームページより

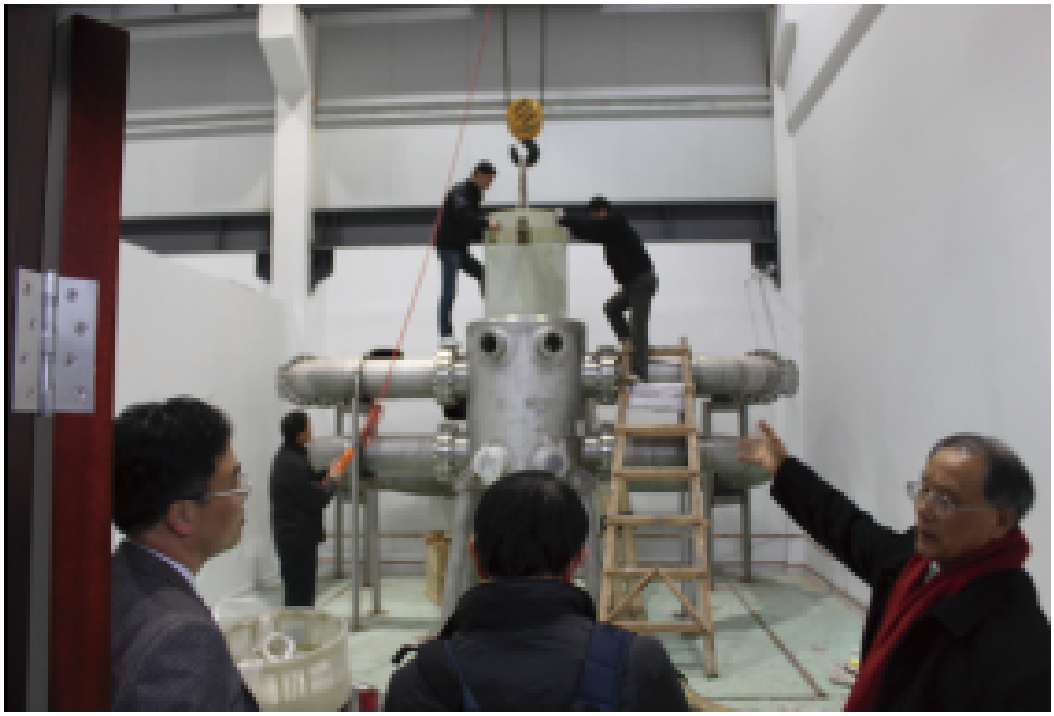
スタッフは全 110 人体制で、うち研究者が 55 人（教授が 22 人）、技術スタッフが 40 人、事務が 15 人の陣容となっている。同じく定常強磁場施設である、日本の物質材料研究開発機構（NIMS）強磁場ステーションの体制が、7 グループ、研究者 20 名弱（兼務含む）であることと比べると、この 3 倍近い規模を有する体制は、非常に手厚い人員配置であるといえる。

磁石に関しては、9 台のマグネット（4 台の水冷マグネット、4 台の超伝導マグネット、1 台のハイブリッドマグネット）を設置することになっている。超伝導マグネットは 3 台を輸入しており、1 年前にすでに納入が終わり、運転が始まっている。水冷式マグネットは今年 5 ー 6 月に完成し、ハイブリッドマグネットは来年に完成予定である。26MW の直流電源と冷却器による水冷装置については、間もなく試験運転が始まろうとしている。NMR の実験は間もなく開始予定である。

写真 11－3　水冷マグネット断面図

© 島津博基

写真 11－4　マグネットシステム設置状況



© 島津博基

実験装置としては、各種のマイクロスコープ、PPMS（Physical Properties Measurement System；電気伝導度、磁気抵抗、ゼーベック係数、ホール特性、磁化率、半導体デバイスの I-V 特性などを計測できるシステム）が設置されている。これらを用いて生命科学、材料科学の研究が開始される予定である。まだ基礎研究が多いが、今後は応用的な研究にも範囲を広げ、基礎と応用の割合を 3:2 位にして行く予定である。

共同利用の形態としては、ウェブで利用申し込みを受け付け、審査委員会で採否を検討する。採択されれば使用料は無料である。最も大口のユーザは同じく合肥市にある中国科学技術大学であると予想される。

国際協力は今後発展させていく予定であり、特に米国、オランダとの協力を検討している。フロリダ国立研究所に長く在籍した Gao 教授が全体の指揮をとっていることから、元来米国との連携が強い。

（3）他の定常強磁場施設との比較

世界の定常磁場による研究施設を示したのが、表 11－1 である。ハイブリッド磁石が現在稼働しているのは、日本の 2 拠点と米国のみである。米国は現時点では 40T 以上の定常磁場を提供する唯一の拠点となっている。

この表で比較する限りにおいては、中国の強磁場科学センターの施設は、日、米、欧の最先端の施設と比較しても、最高磁場で遜色ない。ただ、現在も建設中であり、機器が所期の性能を発揮するかどうかが、今後の課題である。

表 11－1　世界の定常磁場施設　（　）内は目標値。2012 年 1 月時点

研究施設	国	最高磁場（T）	電力（MW）	分担磁場（T） 超伝導 / 水冷銅
東北大学 金属材料研究所	日本	31	8	12/19
物質・材料機構	日本	38	15	14/24
国立強磁場研究所 （フロリダ州立大学）	米国	50	56	12/34
ナイメーヘン強磁場研究所	オランダ	33（45）	20	（12/33）
グルノーブル強磁場研究所	フランス	35（42）	24	（8.5/33.5）
強磁場科学センター	中国	（40）	20	（11/29）

出典：CRDS 調べ（各研究機関のホームページ等より）

4. 国家パルス強磁場センター視察

（1）訪問の概要

①訪問日時：2012 年 3 月 23 日
②訪問場所：湖北省武漢市　華中科技大学
③日本側訪問者：
　島津博基　科学技術振興機構　研究開発戦略センター　フェロー
　三浦　登　物質材料研究機構　若手国際研究センター センター長
　（東京大学名誉教授）
　趙　晋平　科学技術振興機構　中国研究センター　フェロー
④中国側対応者：
　Prof. Li Liang（李 亮）強磁場施設所長、技術開発責任者
　Prof. Yao Kailun（姚凱伦）物理研究責任者

写真 11－5　国家パルス強磁場センターの入り口にて
左より趙（日）、三浦（日）、李（中）、島津（日）

© 島津博基

（2）国家パルス強磁場センターの概要

国家パルス強磁場センターは、湖北省武漢市にある華中科技大学に建設されている。世界の 5 大パルス強磁場科学センターの一つになることを目指している。当初目標としては、12-34 mm Φ の空間に磁場 50T ～ 80T、パルス幅 2250ms ～ 15ms を達成することを目的としていた。建設予算は 5 年間で 1.2 億元であったが、その後追加的に教育部から 0.6 億元の支給を受け、総額は 1.8 億元となった。運転経費は華中科技大学から支給されている。

写真 11－6　国家パルス強磁場センター外観

出典：国家パルス強磁場センターホームページより

スタッフは研究員 28 人、技術スタッフ 21 人、事務職員 6 人、学生 90 人である。同じパルス強磁場施設である東京大学の物性研では 5 研究室、教員 15 人体制（兼務含む）と比較すると、3 倍程度の規模となっている。総面積は 9,000 m^2 である。

11 のパルスマグネットと 7 つの測定室を備え、それぞれを磁化測定、輸送現象測定、光学測定、ESR 測定など各種の実験に使用する予定である。本格的な物性測定はまだこれからという段階であるが、小規模ではあるがすでに共同利用の実験も行われている。

電源設備として 14.8 MJ（25kV）のコンデンサバンクを備えている。その他、100MJ（100MVA）の発電機も設置されており、ロングパルスや、コンデンサバンクとの組み合わせによる強磁場の発生に利用することができるようになっている。またこの他に 600 V、35 kA の蓄電池を設置し、超ロングパルス磁場の発生を行うことも計画されている。（参考：東大物性研のコンデンサバンク（250 kJ, 10 kV）、（900 kJ, 10 kV））

写真 11－7　発電機 100MJ（100MVA）

出典：国家パルス強磁場センターホームページより

写真 11－8　コンデンサバンク　14.8MJ（25kV）

出典：国家パルス強磁場センターホームページより

パルスマグネットに関してはすでに開発が相当進んでいる。2011 年 11 月に外側コイルはソフト Cu で 36 T、内側コイルは Cu-Nb 線材で 47 T を発生し、あわせて 83.1 T を発生した。このとき使用した Cu-Nb 線材の強度は 800 MPa であるが、さらに強い線材を用いれば最高磁場はまだ伸びる可能性がある。

さらにパルス強磁場のその他の応用として、磁場による機械整形の技術開発が計画されており、そのために 1MJ、25kV のコンデンサバンクが設置されている。これを用いて金属板を色々な形状へ整形する加工技術の開発が行われている。また風力発電のローター用

磁石の磁化、パルスマグネットによる磁気冷凍、渦電流ブレーキなどの応用研究も進行している。華中科学技術大学では元々工学系が強く、これらはその特徴を活かした研究であると言える。

共同利用は原則として無料で公開する予定であり、そのために建設費の 10% 程度の予算がついている。現在、共同利用、施設の運営方針などの諮問のためユーザー委員会を組織することを検討している。20 名程度の委員からなる運営委員会と 40 名程度の委員からなる具体的、技術的事項を審議する委員会から成る。

国際協力としては日本、台湾を含むアジアフォーラムの構築を検討している。NIMS の三浦教授が顧問を、東北大の野尻教授が客員教授を務め、技術開発に協力している。東北大で開発した磁気共鳴プローブが提供される等の技術供与も行われ、元来日本との交流が深い。

（3）他のパルス強磁場施設との比較

中国の国家パルス強磁場センターは、非破壊によるパルス強磁場施設である。非破壊での強磁場の限界は、100T であると言われており、世界各国もこれを目指している。既に述べたように、2012 年 3 月に米国は、ロスアラモス国立研究所において、100.75T の強磁場を達成している。

表 11－2 は、その前の本年 1 月時点での各国施設の状況を示している。中国は既述のように昨年 11 月に 83.1T という磁場を達成している。したがって世界的にみても、高いレベルに現在位置していることがわかる。

表 11－2　世界のパルス磁場施設（2012 年 1 月時点）

	国	最高磁場（T）	エネルギー(MJ)
東京大学（柏） 国際超強磁場科学研究施設	日本	84	1.5
国立強磁場研究所 （ロス・アラモス国立研究所）	米国	97.4	600*
ドレスデン強磁場研究所	ドイツ	94.2	50
オックスフォード大学 クラレンドン研究所	英国	60	0.8MW
パルス強磁場施設（ツールーズ）	フランス	50	14
国家パルス強磁場センター	中国	83.1	14.8

＊フライホール発電機　最大電力 1.4GVA
出典：CRDS 調べ（各研究機関のホームページ等より）

5. 強磁場科学における中国の課題

（1）運営の充実

現在の日本と異なり、中国の強磁場施設建設計画は、中国の潤沢な研究開発予算によって担保されている。その一方、強磁場施設のような研究基盤インフラは、ハード面の整備だけでなく、これを運営するノウハウや人材などのソフト面が伴って初めて効率的に稼働するので､今後これらがどのように整備されていくかが注目される。設備が完成した後に、

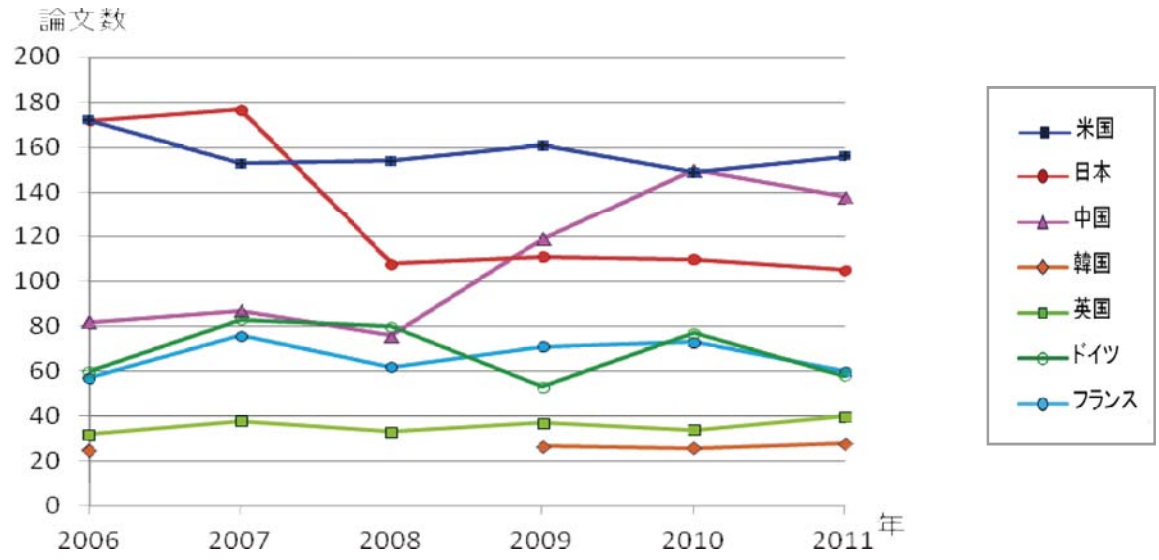
どのようにして施設の円滑な運営が実施されるかを見守る必要がある。また装置開発については産業界との協力も不可欠である。中国の産業界にも今後強磁場関連技術の育成が要請されるであろう。現状ではスタッフあるいは学生が施設の建設現場を支えていると思われる。

現状は、世界最高水準に追いつくための施設整備を行っている段階であるが、両施設ともに計画が順調に進展している。合肥の Gao 教授、武漢の Li 教授はいずれも米国のフロリダ国立強磁場研究所（タラハッシー）の強磁場施設で多年にわたり同施設の建設に協力した研究者であり、彼らの豊富な経験から、両施設とも技術的には極めて高い水準にある。人材としては他にも欧米や日本で測定方法の開発などを学んだ多くの若く優秀な研究者が存在し、全体として日本の研究所の 3 倍規模の人員を擁している。

（2）施設を使った科学研究の強化

今後の最大の課題は、完成した施設でどのような科学研究を行うかという問題である。中国の物質・材料科学研究は現在非常に盛んであることから、強磁場下での物性研究に興味をもつ潜在的ユーザーの開拓や、世界的水準のユーザーを育てていくことが最も重要である。強磁場に関連する論文数だけを見るとすでに日本を逆転しているが（図 11－1 参照）、今後両施設が本格的に稼働することや中国全体の研究者数も勘案すると、今後その数はさらに伸びると思われる。一方、日本では各強磁場施設の共同利用のうち数%は産業界からの利用が占めるが、中国では産業界の利用や連携は現時点ではなく、産業界への波及にはまだ時間がかかると思われる。

図 11－1　強磁場に関連する主要国の論文動向



出典：CRDS 調べ（Web of Science より）

（3）中国の二施設の連携

合肥の強磁場科学センターは中国科学院傘下の組織であるのに対し、武漢の国家パルス強磁場センターは華中科技大に属している。このことから両施設の交流は、これまでのところあまり盛んでないようである。2013 年の施設始動の後、協力・連携が期待される。

両施設の連携に関連して、共同利用の研究における論文の著者名の取り扱いが、両施設で違うことがわかった。合肥の強磁場科学センターでは、共同利用の研究者が論文を出すに際して謝辞に記載することを原則とするという支援を意識した方針であったのに対し、武漢の国家パルス強磁場センターでは、支援を通じて共同研究を奨励し、施設側の研究者を共著者に加えることを期待するということであった。これは定常磁場とパルス磁場という 2 つの異なる磁場装置の性格の違いによるものと考えられるが、将来的な連携を考慮すると、調整の必要があり得ると想定される。

（4）国際協力

米国では MIT の定常磁場を廃止して定常・パルスを統合したフロリダ国立強磁場研究所を建設、ロスアラモスにパルス磁場施設を建設して、1 組織 2 拠点とした。欧州では、フランスのグルノーブルとツールーズの定常およびパルス磁場が合同して国立強磁場研究所を形成し、その他、オランダのナイメーヘンに定常磁場施設、ドイツのドレスデンにパルス強磁場施設が建設され、それらを統合した「EUROMAG」という共同利用のための全ヨーロッパ連携組織を形成している。

今後、中国でさらに装置の開発が進めば、日本、米国、欧州の施設と並んで、強磁場の一つの国際拠点として十分に機能し、国際協力も着実に進むと思われる。武漢では既に、アジアフォーラムといったアジア地域での国際連携プログラムを推進することを検討している。このような連携組織ができれば、強磁場施設を持たない韓国、台湾のような周辺諸国にとっては、強磁場施設の組織的な利用が可能になるという意味できわめて意義深いものになる。また、日本にとっても、新しい情報、人材の交換という意味で非常に重要になると思われる。

強磁場のような先端技術の開発が必須の分野では、新しい技術の恒常的な導入が不可欠である。今後各研究施設では、新しい測定技術や新しい課題の研究が次々に開発されていくと考えられるが、これらの情報や知見を国を超えて施設間で交換していくことは、きわめて重要である。欧州ではすでに、このような地域的な国際連携プログラムによる国際協力が、強磁場科学の発展に大きな役割を果たしている。例えば、定期的なワークショップの開催、若手研究者の相互派遣、共同利用研究の紹介と斡旋、優れた研究に対する顕彰など種々の方策が考えられる。これらをアジアという距離的に近い国々の間で推進していけば、強磁場科学の一層の発展に資することができるであろう。

6. 参考文献等

定常強磁場における将来計画策定合同委員会 『定常強磁場科学における日本の展望』2010 年
日本学術会議科学者委員会 『学術の大型施設計画・大規模研究計画マスタープラン 2011』2011 年
三浦登（責任編集）『強磁場の発生と応用』共立出版　2008 年

第十三章　今回の調査での雑感

科学技術振興機構　研究開発戦略センター
上席フェロー（海外動向ユニット）
林　　幸秀
及び　フェロー（海外動向ユニット）
岡　山　純　子

今回、科学技術振興機構の研究開発戦略センターの職員を中心に、合計二十名を超えるスタッフが、中国の最先端の科学技術現場を訪問し、研究施設等を視察するとともに、現地の研究者や技術者と議論を行った。その科学技術的な内容は、これまでの章に記述してあるところであるが、中国という外国での調査であるため、日本の研究現場にないものに遭遇したり、中国の社会的な側面にも触れることになる。今回予めそのような事態を想定して、研究の具体的な内容とは別に、今回の調査で感じたことをまとめて提出するよう、現地調査に赴くスタッフに対し依頼しておいた。

調査に赴いたスタッフから出されたものをざっと並べてみると、大くくりでいくつかの固まりとしてまとめることができると思われた。そこで一人一人の感想を、カテゴリーを定めて並べたのが以下である。なお、極めて個人的なものであるので、匿名としてある。また、どこの施設の調査を行ったスタッフからのものかについて、できるだけ判らないように修文してある。

このような試みを通じて、中国の研究現場の状況を知る一助となれば幸いである。

1．研究人材

○中国研究者の方々の名刺を見て驚いたが、皆若いと思われるが重要な地位に就かれている。若い研究者が新しい研究拠点作りなども任されているようである。日本では、拠点作りのところまで世代交代が進んでいないのではないかと思う。大きな事業は、経験もいるが、貫徹するエネルギーも必要である。一面を見ただけの感想にすぎないが、「中国はここ当分、若いエネルギーの爆発型で前に進むのであろう」というのが今回の私的な印象である。

○若手は英語がぺらぺら。海外のどこかに留学しているものが多い。そんな優秀な人々が将来この国を支えていると思うと日本は既に負けている。

○訪問した時、特に感じていたのは、中国の研究の現場ではやはり若さと留学歴が印象深い。各ユニットリーダーは 30 代または 20 代、他の技術者も殆ど 20 代である。また、あるセクションでは、チームリーダーは殆ど女性で、全員海外留学経験者で、20 代後半であった。他の訪問した研究所でも同様、研究所長もほとんど留学歴があり、40 代が多く、30 代もいた。こういう意味では、中国の多くの海外人材呼び戻し政策は効果があるといえる。

○行政機関でも、メーカーでも、研究現場でも、年老いて目がトロンとした人がほとんどいないのが印象的。若い人たちの熱いまなざしがまぶしかった（戦後の日本はこうだったのだろう）。

○若手の人材育成は、中国国内の教授のレベルが低すぎるので、海外の大学などへの派遣に頼らざるを得ない状況はまだ続いている。中国人は人材育成などで大風呂敷を広げるが、それに惑わされるなと思う。

○私たちが会った研究者や企業は国内需要に目を向けている人が多く、意外に内向きに見えた。国内に巨大な市場を抱えているためかもしれない。あるいは、海外の市場をつかんで活躍している人たちはごく一部であり、我々はそういう人にまだ会っていないだけかもしれない。

○まじめで着実に研究開発に取り組んでいて、特に、自分たちの活動を過大評価したり、逆に、過小評価しているとは感じられなかった。海外の動向はよく勉強している。日本に対して特にライバル意識があるようには感じられなかった。

○教授ポストに外国帰りの若い研究者（30 代）が多く、日本に比して若い教員間でのネットワーク作りが重視されているように感じられた。また成果を上げたい各大学が、優秀な研究者を確保することに熱心である印象を受けた。

2. 研究環境・研究手法

○施設を訪問したとき、中国の論文発表数の急増原因の一つが分かった。現場の研究員によると、科学院の研究所によって違いがあるが、その研究所では、国際科学誌（ネーチャー、サイエンス等）で論文が掲載された場合、一本約 10 万元（120 万円）のボーナスがもらえる。国内誌の場合でも、そのレベルによって国際誌より少ないが、数万元のボーナスがもらえる。そもそも研究者達は科学技術の原理に対する追求に研究を進める原動力があると思うが、このような金銭的奨励に賛否両論あると考えられる。少なくとも、多く業績を出す研究者は評価されるという意味で、これは中国の研究者にとっては大きなインセンティブとなっている。結果、論文産出が急増している。

○研究開発予算は、過去に比べれば、潤沢になったと述べていた。確かに、新しい建物も建っていた。しかし、研究現場隅々にまでその恩恵が行き渡っているという感じでもなく、ずいぶん古い施設もあった。

○北京市内は大通りに沿って中国科学院の各分野の研究所が多数配置されており、いずれも敷地が広く建物も立派で、研究環境としては非常によいと感じる。今回訪問した研究機関は、研究の川上である要素技術の研究しか行っておらず、研究範囲が非常に狭いと思われた。そのため華々しい成果は出にくいと感じられた。また試験装置なども、日本では民間企業のメーカー程度が保有しているようなレベルで、国家的なレベルの研究施

設とはいえないように思われた。しかし、そこの研究者から話を聞くと、メーカーや中国科学院の他の研究所と連携することとなっており、自分のところは主として基礎的な研究所として意義があるとのことで、その意味でやむを得ないのかもしれない。中国科学院の組織設計により、それぞれの研究所が重複なく一分野を担っていることによると思われる。

○研究施設を訪問して、中国の「グローバル化」という意味を理解できた。中国の5カ年計画では、よく「自主イノベーション」、「自主コア技術」という言葉がみられる。しかし、研究施設の建設現場では、施設を完成させるために、中国の技術、人材、部品が不足であれば、世界から調達して、目標達成することが重要視される。中国のトップレベルの施設は、国際入札や世界の多くの研究機関との共同開発によって作られたものも多い。最終的には世界科学の発展のためであるので、世界から様々な資源を集めて研究開発等を進めた方が効率的だと思う。

○韓国のような厳しい選択と集中も見られず、主要な研究所や大学では、一通りどんな技術にも取り組んでいるように見える。ただし、現状は頭が下がるような素晴らしい技術は見られない（見せてもらえていないだけかもしれないが）。

○国産技術へのこだわりはあまりなかった。目的を達成するために、世界からベストな技術を集めているという感じであった。

○研究現場を見ると、技術を自分たちで開発したいという「ものづくり至上主義」は無く、必要なものは交渉して買ってくればよいというスタンスが印象に残る。海外の良いものを手に入れようとする姿勢は極めて柔軟で、技術（装置、部品等）を諸外国から買ってきたり、外国人の有識者を客員教授に据えてしまうといった判断は非常に合理的に見える。

○研究開発である程度の成果が出ると、その先は研究成果をビジネスにつなげようとする姿勢は強い。また、海外の研究機関や企業との連携など、研究資金等につながりそうな話には、どの研究者も非常に積極的な姿勢を感じた。一方で従来型の基礎研究を地道にやっている研究者は、学会では高い評価を受けていても、あまり羽振りがよい感じはしなかった。

○ランチミーティングで副学長が、研究者の声を直接吸い上げつつトップダウンで指示する場面を見て、意思決定システムの早いことを実感した。

○中国は、米国コールドスプリングハーバー研究所が主催して世界中のライフサイエンス分野のトップの研究者が集まる国際ミーティングのアジア版を、2011年春蘇州に誘致することに成功した。これにより、世界中のライフサイエンスの分野のトップ研究者が、毎月のように蘇州に集まり、最先端の研究情報の交換等を行っている。これは、米国のネットワークを使って、中国を知のネットワークのハブにする戦略の一つとも考えられ

る。

3. 政治、地方政府

○中国は、政治機構は違っても、実利を合理的に追求する合理的な人たちの国であるというのが素朴な感想である。公平性や透明性について問題提起ばかりする先進諸国を横目に、力ある者が実利をつかんで次々に台頭しているように思える。多少不公正な資金の使われ方はあるかもしれないが、そういうものをある程度寛容している点も、現状では、技術の発達に活力を与えていると感じた。

○今回の調査で一番考えさせられたのは、中央共産党と各地方都市の関係であった。北京、上海、大連等の市長が中央の共産党から任命されるのは知っていたが、各市長が常に中央を気にしながら市政を執行しているのが、十分に理解できた。日本の橋下大阪市長のような存在は、中国の人にはほとんど信じられないと考えられる。中国で、大きなプロジェクトを進めるインセンティブとなっているのは、共産党内における熾烈な競争が背景にあると感じた。逆に見れば、それだけ中国共産党の人事評価は厳しいものがあるのであろう。

○中央政府や地方政府の方針で、重要研究テーマがドラスティックに変化するため、研究者が政治の動向を強く意識していると感じた。中央政府の方針と地方政府の資金とで大型施設が完成したものの、利用料だけではとても巨額な設備の運営・保守の費用をまかなえないこともある。そのため、施設の責任者らは地方政府からの資金がストップすることを非常に危惧しており、何とか当該施設の有用性をアピールしたいと苦心しているようだった。

○今回施設を訪問した時、中国の有力企業の発展にとって、地方政府との協力関係が非常に重要だと感じた。もちろん中央政府からの資金援助も重要だが、それ以上に地方政府から土地供給、融資などの面で優遇を受けるために、地方政府と一緒になって研究所を作ったり、国際シンポジウムを開催したりすることに注力しないといけない。地方振興のため、企業自身の発展にも、地方政府とのつながりは不可欠であろう。

○欧米や日本でも貧富の差の拡大の問題はあるが、おそらく中国ほど極端ではない。市民、農民の不満が噴出しないよう何とか抑えているのが、今の中国政府の状況ではないのかと強く感じた。

4. 日本との対比

○今回の調査に同行した日本の専門家は、日本の状況を次のように嘆いていた。
「大規模研究施設の建設では理論よりも土木工事の方が重要とのことである。そして、自分たちの世代は、良くも悪くも貧しかったので、自分で装置をいじりつつ、理論と照らし合わせて装置を半ば手作りしていった。よって、大規模装置を組む際に、うまくい

かない点があっても、どうすれば良いかの勘どころを自分で持っており、外注企業に対して指示が出せた。しかし、自分の弟子の世代となると、きれいな理論に集中する傾向があり、理論面では自分を上回ってきたと思いつつも、実用面に落とし込む力の欠如を感じる。一方、中国の研究者は、理論とか実用とかは関係なく、目的に対して必要なことはなんでもやるがむしゃらさがある。」

○中国では、中国科学院が中心となって研究機関と研究開発の成果を応用する現場の距離を近付けているように感じられるが、日本では省庁の縦割りによるさまざまなレベルの研究機関が多数あって、統合化など数合わせの議論が先行しており、あまり研究内容の本質からの議論は行われていないように見える。また縦割りの弊害として重複開発や連携不足などの非効率が生じるだけでなく、システム全体を見渡した開発分担など省庁の壁を超えるような技術開発もなかなかできないのが現状である。

○中国が、独自の政治形態で科学技術の進歩を推進していく一方で、日本の科学技術力がガラパゴス化と行政の貧弱さに翻弄されて衰退の道を歩みそうな気がする。勢いのある中国の姿を見ていると、「世界に冠たる日本の技術」という固定観念が吹き飛ばされ、中国に完全に負けてしまう日は遠くないと痛感した。多くの人に中国の研究開発現場の雰囲気を知ってほしいと思う。

○中国では、いろいろな分野で情報の集約化、ネットワーク化が図られつつあると感じている。例えば、世界中に留学等をして散らばっている中国人研究者を含めて、国内外の中国人と留学先等の外国人の研究者との間で、ネットワークが構築されつつあると感じている。インターネットの時代に、このような知のネットワーク化が加速度的に進んでいる印象があるが、日本は逆に、鎖国状態となって孤立しているのではと思う場面が多々見られることが心配である。

○日本では、知財問題等により中国からの留学生は受け入れていない例も見受けられる。優秀な人材を受け入れて将来連携して行く必要があるのに、このような非国際的な対応（制限）を続けていると、世界がグローバル化・ネットワーク化していく時代に、日本は家電と同様に、研究開発の分野においてもガラパゴス化して、5 年後 10 年後には人材や情報等の鎖国状態に陥っていることも十分に考えられる。

5. 中国の科学技術情報の不足

○日本の研究者や行政官等にとって中国の情報は殆ど届いていない状況であり、もう少し中国の情報を体系的に収集・整理して研究者等に提供していくことが必要ではないか。

○日本人は隣国の中国の現実を知らない人がまだまだ多く、それは日本にとっては好ましいことではない。中国は一つではなく、単一民族で島国の日本人では計り知れない多様性を持っているので、中国を理解することは難しい。日本は、国として組織として個人としても、隣国の中国と共生していくことは避けられない。科学技術の世界でもそれは

全く同様である。

○中国研究水準に対する評価は、人によって大いに異なるので、できるだけ多くの専門家や研究所に足を運ぶことが重要である。特に、中国が好きな日本人ほど中国の研究力を高く評価しがちである。また、中国側の話をそのままリポートすると、中国の科学技術の宣伝役にされてしまうおそれがあるので注意する必要がある。

6. 日中科学技術協力

○研究者がボーダレスに移動していく時代に、日本の強い部分を伸ばし、知のネットワークのハブとなる戦略、政策を、待ったなしで真剣に考えていく必要がある。

○急速に大国化する中国を隣国とする日本にとって、中国との関係強化は不可欠であり、特に企業にとっては巨大な中国市場でのビジネスを成功させるためには中国に拠点を置くことが自明の理となる。また、研究環境も資金、場所、人材などの面でメリットがあり、日本では行えない研究も可能である。

○日本の技術が優位にあるうちに、中国から出てくる可能性のある新たなイノベーションに対し、協業する形で Technology Learning を共有する仕組みづくりを行うべきではなかろうか。日本は化学分野のレベルが高いが、臨床試験の実施に関して様々な課題を抱えている。日本の基礎医学、薬化学を中国の臨床と結びつけることは、両国にとってメリットがある可能性が高いと考える。欧米のメガファーマに対抗するためにも、考えても良い日中の国際協働であろう。ただし、中国側は日本だけに目が向いていないだろう。国際共同臨床試験となると、中国はパートナーとしてメガファーマと結ぶ可能性も高い。どのような日中協働体制にするかで、良い知恵がいると考える。

○中国人にとって国際共同研究とは､海外から技術を学び導入することを指すと思われる。政府への申請書に、そう書かないと海外との共同研究を認めてもらえない。平等互恵というのはそれを隠すための言い方であり、注意が必要である。平等互恵に基づく水平の日中協力では、日本にプラスにならない。日本は装置のキーテクを握り、サイエンスの本質でリードして、日本人研究者が指導して中国の大型装置を利用する形で研究成果を上げる手法を行うべきである。

7. 中国の社会

○空港、地下鉄が、やたら大きい。利用している人数も多いが、空間が広いので、混雑をさほど感じなかった。中国では、公共利用施設をとにかく大きく作ろうとしているのだろう。調べてみると、上海浦東国際空港の総面積は 40 平方キロ、一方成田空港は 9.4 平方キロ、と圧倒的に浦東が大きい。地下鉄のホームや、乗り換えの通路も広い。感覚的に、日本の倍以上の面積があったように感じた。

○大きすぎて掴み所がない（特に北京）、でかいビル、大量の車、溢れる人々・・・・。全てに規模が大きく、どこまでも広がっていきそうで全体がどうなっているのか把握できない。

○くすんでチンケになりつつある日本と違い、活気というか熱気がある。伸びつつある雰囲気である。

○昔の日本のようで洗練されていないかと思っていたが、実際には北京は都会そのもののイメージ。だがデポジット制度等人を信用していないフシがある。ぼやぼやしていると放っておかれる。中国語ができないと怖いと感じた。

○上海の空気は、すがすがしく、気持が良かった。ところが、北京に着いた途端、空気が悪いと感じた。車が多すぎで、排ガス由来の微粒子が多いという話であった。日本の環境技術をもっと持ち込んで、汚染を減らした方が良いと思う。現在、中国の政治中心は北京であるが、大気汚染や水不足などがあり、北京の都市としての発展はこのままでは行き詰まる可能性があるように思う。現在でも中国国内で、最も人口の多い都市は上海である。都市としての可能性は、北京よりも上海の方が圧倒的に有利ではないかと想像する。

○上海を訪問した際の説明の中で、「中国の人が普通に大学を出て一生会社に勤めても、上海で住宅を買うことはできないが、郊外のここでなら住宅を買うことができる。」との説明があった。上海の高級レストランでは富裕層が豪華な食事をしていたが、帰り道の地下鉄の駅からホテルに帰る雨の路上では､赤子を連れた母親がもの乞いをしており、お金を恵まずにはいられなかった。

○上海は想像以上に街がきれいである。警官を一定間隔おきに配置し、街の環境・治安を維持している一方で、大通りを数本内に入れば相当古い住宅街が残っており、格差を感じる。

おわりに

今回の調査は研究現場にこだわったものであり、研究現場を訪問して施設を視察するとともに関係者とインタビューを行ったチームの一人が、報告書の作成に当たった。具体的な担当者名と所属は、各章の最初に記してある。また、それぞれの略歴については、この後に列記した。なお第十三章だけは、前の十二章までの担当者から提出を受けた感想をもとに、今回調査の事務局的な業務を行った岡山がとりまとめ、それを林が加筆したものである。

以上のような経緯であるが､担当者からの報告原稿を林と岡山が加筆修正しているため、各章の文責は各章の担当者だけでなく林と岡山が併せて有することになることを申し添える。

今回の調査は、三ヶ月程度の比較的短期間に中国各地を訪問し、報告書の作成もその後三ヶ月弱で行っている。その意味でハードワークであったと思うが、参加したスタッフは皆生き生きと対応していた。中国という不思議な魅力を持つ対象に取り組んだからであろう。

また､近いとはいえ外国である中国の施設を訪問するとなると､日程などのアレンジや､相手方とのアポイント、現地での通訳などが大変であるが、今回の訪問のほとんどで、中国総合研究センターのスタッフに協力してもらった。改めて感謝申し上げたい。

今回は、中国の施設や装置を見て、それをできるだけ客観的に評価分析することにしたため、日本側の専門家などにも大変協力をいただいた。本文中に記した方以外で、今回の調査に協力いただいた方々を下記に列記する。ここに改めて、感謝の意を表することとしたい。

（全般）
大江田　憲治　（独）理化学研究所　理事
大畑　拓雄　（独）理化学研究所　外務部　研究協力課
（第一章関係）
油谷　泰明　（独）理化学研究所　計算科学研究機構　研究支援部長
黒川　原佳　（独）理化学研究所　計算科学研究機構　専任技師
（第二章関係）
加藤　康宏　（独）海洋研究開発機構　前理事長
（第三章関係）
牛草　健吉　（独）日本原子力研究開発機構　核融合研究開発部門副部門長
小森　彰夫　自然科学研究機構　副機構長　核融合科学研究所所長
玉井　広史　（独）日本原子力研究開発機構　核物質管理科学技術推進部研究主幹
多田　栄介　（独）日本原子力研究開発機構　核融合研究開発部門
ITER プロジェクト・ユニット長

杉本　誠　（独）日本原子力研究開発機構　核融合研究開発部門
ITER プロジェクト・ユニット ITER 計画管理・協力調整グループ長
谷川　博康　（独）日本原子力研究開発機構　核融合研究開発部門
核融合エネルギー工学研究開発ユニット
核融合炉構造材料開発グループリーダー
林　巧　（独）日本原子力研究開発機構　核融合研究開発部門
核融合エネルギー工学研究開発ユニット　研究主幹
熊澤　隆平　自然科学研究機構　副機構長　核融合科学研究所　教授
室賀　健夫　自然科学研究機構　副機構長　核融合科学研究所　教授
山田　修一　自然科学研究機構　副機構長　核融合科学研究所
大型ヘリカル研究部装置工学・応用物理研究系准教授
（第七章関連）
ダグラス　シップ　（独）理化学研究所　広報国際室長
（第九章関連）
野口　邦男　自然科学研究機構　国立天文台教授
（第十章関連）
石川　哲也　（独）理化学研究所播磨研究所所長
田中　均　（独）理化学研究所播磨研究所 XFEL 研究開発部門長
平田　邦生　（独）理化学研究所播磨研究所技師
鈴木　昌世　（財）高輝度光科学研究センター部長
廣澤　一郎　（財）高輝度光科学研究センター室長
登野　健介　（財）高輝度光科学研究センター研究員
薫　宇輝　北京高エネルギー物理研究所研究員
雷　康斌　（独）理化学研究所北京事務所所長
伊藤　裕司　（独）理化学研究所播磨研究所企画課
（第十一章関連）
今中　康貴　（独）物質材料研究機構先端的共通技術部門
木吉　司　（独）物質材料研究機構企画調整室長
嶽山　正二郎　東京大学物性研究所教授
野尻　浩之　東北大学金属材料研究所教授

調査スタッフを代表して、
林　　幸　秀

筆者紹介

林　幸秀（はやし　ゆきひで）

（独）科学技術振興機構研究開発戦略センター上席フェロー（海外動向ユニット担当）。東京大学先端技術研究センター特任教授。1973 年東京大学大学院工学系研究科修士課程原子力工学専攻卒。同年科学技術庁（現文部科学省）入庁。文部科学省科学技術・学術政策局長、内閣府政策統括官（科学技術政策担当）、文部科学審議官などを経て、2008 年（独）宇宙航空研究開発機構副理事長、2010 年より現職。著書に「理科系冷遇社会ー沈没する日本の科学技術」。

豊内　順一（とようち　じゅんいち）

（独）科学技術振興機構研究開発戦略センターフェロー（システム科学ユニット担当）。東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。1981 年日立製作所入社。高信頼システムアーキテクチャ、分散コンピューティング基盤などの研究開発、および国際標準化に従事。2011 年 9 月から現職。

植田　秀史（うえた　しゅうし）

（独）科学技術振興機構研究開発戦略センター副センター長。1976 年東京大学工学系大学院修士課程卒業。同年科学技術庁（現文部科学省）入庁。2004 年内閣衛星情報センター管制部長。2008 年より現職。

寺岡　伸章（てらおか　のぶあき）

（独）日本原子力研究開発機構核物質管理科学技術推進部技術主席。1956 年熊本県八代市生まれ。東京工業大学電子化学専攻修士課程修了。1982 年科学技術庁（現文部科学省）入庁。科学技術庁基礎研究推進企画官、大型放射光施設推進室長、タイ国家科学技術開発庁長官顧問、国立極地研究所事業部長、（独）理化学研究所中国事務所準備室長（北京）などを経て現職。朝日新聞社ウェブ論座執筆（2010 年 12 月ー12 年 3 月）、NPO 日中産学官交流機構幹事、個人ブログ開設中。

秦　舟（しん　しゅう）

（独）科学技術振興機構中国総合研究センターフェロー。1976 年 2 月 8 日中国北京生まれ。1994 年に来日。2008 年 3 月、東京大学総合文化研究科国際社会科学専攻博士課程単位取得満期退学。2008 年 3 月より現職。現在、調査研究プロジェクト及びウェブサイトの情報発信事業を担当し、中国の科学技術政策及び分野別研究現状、高等教育の政策と現状、技術移転・産学官連携の状況等に関する動向調査、日中情報発信関連事業などに従事。

和田　智明（わだ　ともあき）

東京理科大学特命教授。（独）科学技術振興機構研究開発戦略センター特任フェローを兼務。1977 年に科学技術庁（現文部科学省）に入庁後、文部科学省科学技術政策研究所長、

内閣府大臣官房審議官などを歴任。2010 年 10 月より現職。

佐藤　真輔（さとう　しんすけ）

文部科学省ライフサイエンス研究振興分析官（課長級スタッフ）。1985 年東京大学大学院理学系研究科生物化学専攻修士課程修了。同年科学技術庁（現文部科学省）入庁後、ライフサイエンス、環境、IT、物質・材料、原子力等、広範な科学技術分野の政策の企画立案等に携わる。現在はライフサイエンス分野全般における､海外状況を中心とした調査･分析業務を実施。

渡辺　泰司（わたなべ　やすし）

（独）科学技術振興機構北京事務所所長。1986 年埼玉大学理学部生化学科卒。同年科学技術庁（現文部科学省）入庁。科学技術庁ライフサイエンス課課長補佐、（独）理化学研究所筑波研究所企画課長、東京大学医科学研究所教授、（独）放射線医学総合研究所経営企画主幹、内閣府日本学術会議事務局参事官などを経て、2009 年末より現職。

嶋田　一義（しまだ　かずよし）

（独）科学技術振興機構研究開発戦略センターフェロー（電子情報通信ユニット）。2000 年早稲田大学大学院理工学研究科電子･情報通信学専攻　博士課程修了（工学博士）。早稲田大学理工学部助手､財団法人武田計測先端知財団プログラムオフィサーなどを経て、2008 年より現職。

辻野　照久（つじの　てるひさ）

（独）科学技術振興機構研究開発戦略センター特任フェロー。1973 年東北大学工学部電気工学科卒業。同年日本国有鉄道入社。1986 年宇宙開発事業団に転じ、2011 年（独）宇宙航空研究開発機構を定年退職。現在は同機構国際部特任担当役。文部科学省科学技術政策研究所客員研究官も兼任。2011 年に G-TeC「世界の宇宙技術力比較」を実施。

岡山　純子（おかやま　じゅんこ）

（独）科学技術振興機構エキスパート（研究開発戦略立案担当）、研究開発戦略センターフェロー（海外動向ユニット・中国 / 韓国担当）。早稲田大学理工学研究科修士課程修了。株式会社日本総合研究所にて、経営コンサルタント、公共コンサルタントを経て 2005 年末から現職。東アジアを中心とした海外の科学技術政策動向調査を行うと同時に、中国総合研究センター設立の企画立案から立ち上げまでも併せて実施。

島津　博基（しまず　ひろもと）

（独）科学技術振興機構研究開発戦略センターフェロー（ナノテクノロジー･材料ユニット）。大阪大学大学院理学研究科修士課程修了。（独）科学技術振興機構入社後、産学連携事業、文部科学省情報課派遣などを経て、2010 年度より現職。

青木　一彦（あおき　かずひこ）

（独）科学技術振興機構北京事務所副所長。青山学院大学大学院国際政治経済学研究科

修士課程修了。国際協力コンサルタント等を経て、2008 年 11 月（独）科学技術振興機構入社。2010 年 11 月より現職。専門は新興国経済等。

CRDS-FY2012-OR-01

海外動向報告書

中国の科学技術力について
～世界トップレベル研究開発施設～

平成 24 年 6 月　June 2012

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
海外動向ユニット

〒 102-0076　東京都千代田区五番町 7
電　　話 03-5214-7481
http://crds.jst.go.jp/

© 2012　JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.
Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA C CTAACT CTCAGACC

CT CTC G CC AATTAATA

TAA TAATC

TTGCAATTGGA CCCC

AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC

ATAAGA CTCTAACT CTC G CC

AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT

CTC G CC AATTAATA

ATTAATC A AAGA C CTAACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

CTC G CC AATTAATA

TTAATC A AAGA C CTAACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

ATTAATC A AAGA C CT

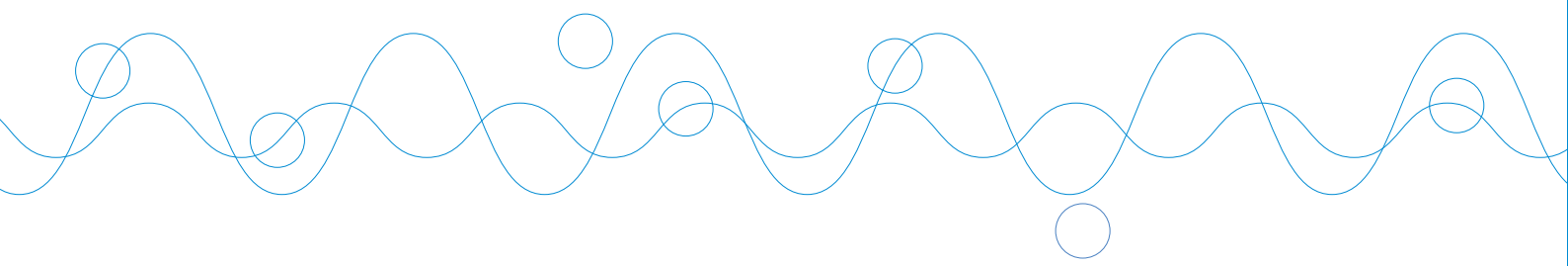
GA C CTAACT CTCAGACC

0011 1110 000

00 11 001010 1

0011 1110 000

0100 11100 11100 101010000111

001100 110010

0001 0011 11110 000101