

独立行政法人**科学技術振興機構**
国際共同研究事業
追跡評価用資料
(追跡調査報告書)

多価冷イオンプロジェクト(1997～2001)
代表研究者 大谷俊介

目次

1. はじめに	2
2. 研究の発展と展開図	3
3. プロジェクトの研究成果と継続・発展の状況	
3.1 プロジェクト期間の成果	
3.1.1 プロジェクトのねらいと設定されたテーマ	4
3.1.2 Tokyo-EBIT の開発と改良	4
3.1.3 原子物理の解明	5
3.1.4 多価イオン照射による表面励起の研究	6
3.1.5 英国での研究成果	6
3.2 プロジェクト終了後の研究の継続と発展	
3.2.1 EBIT 装置	6
3.2.2 原子物理の解明	6
3.2.3 多価イオン照射による固体表面励起の研究	7
4. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的、経済的な効果・効用及び波及効果	
4.1 科学技術の進歩への貢献	
4.1.1 EBIT 装置の普及	14
4.1.2 天文学への貢献	14
4.1.3 核融合開発への貢献	15
4.1.4 物理学の基礎への貢献	15
4.1.5 原子分子データベース	15
4.2 研究成果から生み出された社会的、経済的な効果・効用及び波及効果	
4.2.1 プロジェクト成果から期待される技術革新・イノベーション	16
4.2.2 大学や研究機関などで行われているプロジェクト成果の応用に向けた取り組み	17
4.3 統計資料に見た科学技術への影響	
4.3.1 主要論文の被引用件数の推移	19
4.3.2 研究グループ別論文数の推移：キーワード検索の結果	20
4.4 人材育成の面から見た ICORP 参加研究者の活動状況	
4.4.1 参加研究者の現況	22
4.4.2 学位取得と受賞	23
5. 国際研究交流による研究活動への効果	23
6. 引用文献及び特許	
6.1 参考文献	24
6.2 特許	26
7. おわりに	27

1. はじめに

1970年代中頃から、核融合炉の研究開発過程において、核融合プラズマ中で不純物として存在する多価イオンが核融合反応を阻害する因子として注目され、多価イオンを制御することを目的に研究が盛んになった。初期の研究では加速器により生成される高速の多価イオン研究が主流であったが、高精度の低エネルギー実験に適した多価イオン源が開発されていった。

その中で、EBIS(Electron Beam Ion Source)は低速の多価重イオンを生成する装置としてロシアで発明されたが、1980年代初めに名大プラズマ研で開発された cryo-NICE が世界をリードする装置となった。EBIT(Electron Beam Trap)は、原理はEBISに基づくが、高強度のイオンビームを引き出すことより、低速のイオンを長時間安定に捕獲(トラップ)して多価イオンの精密分光を行うことに特化して、トラップ領域を短くした装置である。米国のローレンス・リバモア国立研究所(Lawrence Livermore National Laboratories, LLNL)で1987年に開発され、その技術導入によりオックスフォード大学で同型の2機のEBITが作られた(そのうち1機はNISTに移転)。

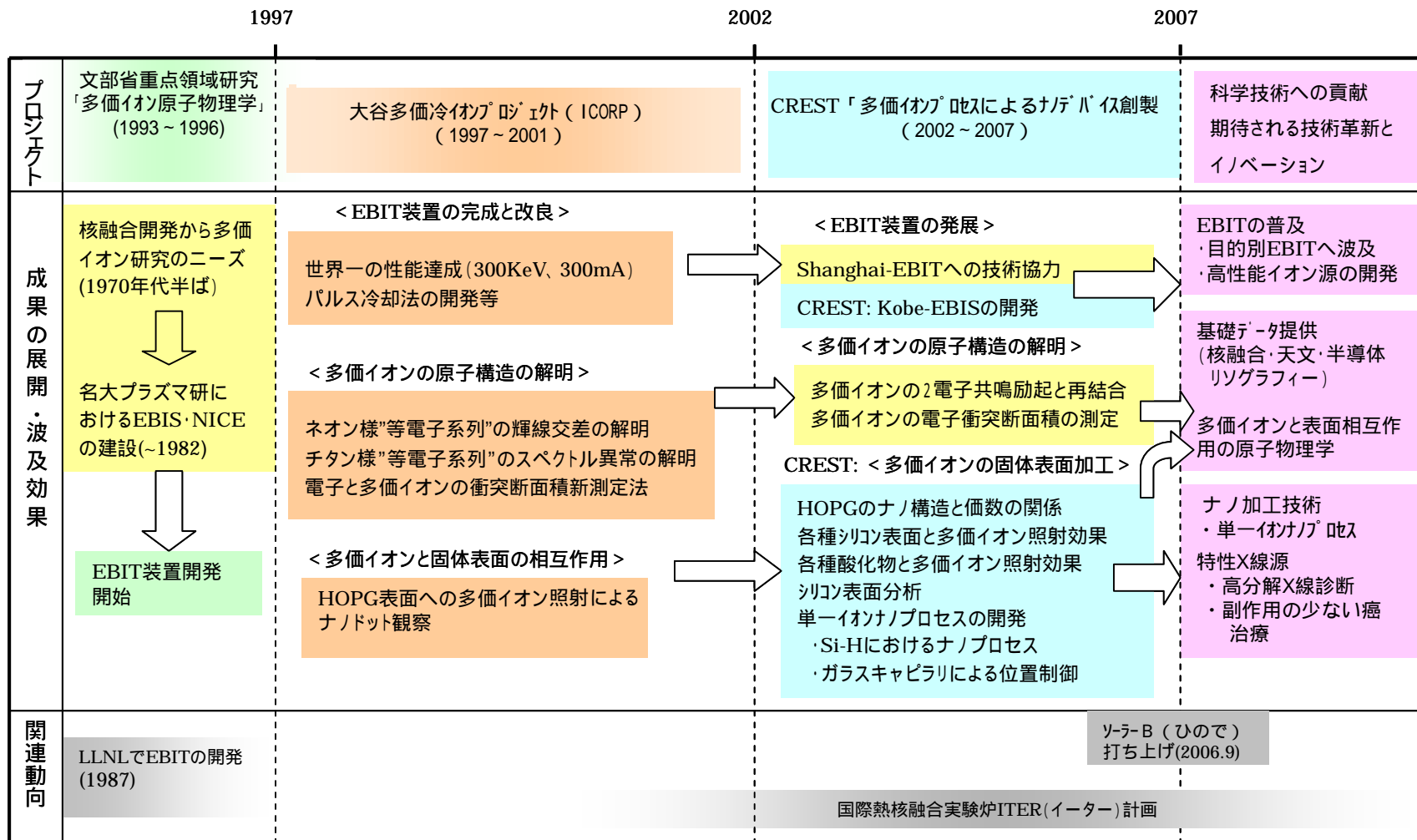
日本では本プロジェクトの代表研究者が cryo-NICE の開発を経て、上に次いで世界で4機目のEBITを開発した。50人の研究者を組織する文部省の重点領域研究「多価イオン原子物理学」(1993~1996)を経て、本プロジェクトで装置の完成を見た。完成した装置はTokyo-EBITと呼ばれ、後述のように世界最高性能を実現した。初期の先行するEBITがLLNLの技術を導入したのに対して、設計から製造まですべて独自の技術で開発された。

多価イオン研究の目的は基礎研究から応用研究にまで広く跨る。太陽コロナを初めとする宇宙のプラズマ、さらに核融合実験炉の高温プラズマの中に高度に電離した多価イオンが存在する。これら多価イオンの分光から、プラズマの温度や密度など重要なパラメータを知ることが出来る(プラズマ診断)。また、核融合炉の実現のために多価イオンの分光学的知見は不可欠な基盤となる。

一個の多価イオン内の電場の大きさは、他の人工的手段で作り出せる電場より格段に大きく、最内殻の電子は光速に近い速度を持ち、相対論的な効果、量子電磁力学的効果(QED)を強く受けるので、これらの理論を検証するには最適な対象である。この目的には精密なスペクトル解析(可視光からX線までの)手段を持つことと、ドップラー効果が小さく、長時間の測定ができるEBITの組み合わせが最適であった。

多価イオンの応用の芽として、多価イオンの持つ極めて大きなポテンシャルエネルギーの利用がある。多価イオンが固体表面に達すると、表面近傍の電子を瞬時に取り去る結果、ナノサイズ領域の原子の再配列が爆発的に起きると考えられている。すなわち、スパッターのような運動エネルギーでなく、イオン一個のポテンシャルエネルギーによる超微細表面加工技術へと発展する可能性がある。さらに、多価イオンは多様な励起準位を持つゆえに特性X線の宝庫である。多価イオンから生じる特性X線は、患者への負荷の小さなガン治療法、高精細な生体組織撮影などの医療応用、さらには半導体の次世代リソグラフィーのための光源としての応用も展望される。これらの応用、あるいはその基盤的研究のために、目的に特化して操作性の良い多価イオン源が開発されるようになった。

本プロジェクトは、上記のような基礎的研究、基盤的研究、さらには応用の萌芽となる研究の多くに関わった。開発した汎用的なEBIT装置は目的別の装置開発に影響を与えるなど、分野の確立と拡大に貢献し、研究コミュニティの中心として影響を与えた。



2. 研究の発展と展開図

3. プロジェクトの研究成果と継続・発展の状況

3.1 プロジェクト期間の成果

3.1.1 プロジェクトのねらいと設定されたテーマ

本プロジェクトのねらいは、世界最先端の EBIT 装置を開発し、これではできない多価イオンの研究を展開して、広く原子物理学の研究の発展に貢献することであった。具体的には、目標は次の三つの柱からなった。即ち、

あらゆる重イオンに対応できる EBIT 装置そのものを完成させ、さらに性能をあげること。

原子物理学の観点から多価イオンの基礎的理解に貢献すること。この中には QED 検証への試みを含む。

多価イオンの固体表面への作用を研究し、その現象を理解し応用への展開を図ること。

上の二番目の目標のために英国 / オックスフォード大学と英国 / 国立物理学研究所 (National Physical Laboratories, NPL) と研究協力した。オックスフォード大学は低エネルギーの EBIT を持ち、Tokyo-EBIT とはイオン種の得意分野において相補的な関係にあり、本プロジェクト以前から協力関係にあった。両者の組み合わせにより、軽原子から重原子まで広く研究対象とすることができた。また、NPL は優れたレーザー分光技術により本プロジェクトに貢献した。NPL にとっては、イオントラップという共通の技術対象に関心があった。長時間トラップしたイオンをレーザー冷却し、イオンの遷移周波数を精密に測定することにより、時間標準精度の改善を目指した。

3.1.2 Tokyo-EBIT の開発と改良

開発された Tokyo-EBIT は次のような特長を持つ。

原子に衝突させる電子のエネルギーが最高値 300KeV と世界最高のエネルギーを持つ。130KeV 以上のエネルギーを持っていれば理論的に自然界で最も重い原子であるウランウムを原子核のみの裸のイオンを生成できる。しかし、目的とする多価イオンの生成量を考えると 200KeV 以上のエネルギーが必要である。当時 100KeV 以上のエネルギーを持つ装置は LLNL の Super-EBIT (200KeV) と Tokyo-EBIT のみであった (現在は世界で 4 台)。

エネルギーだけでなく、電流が最大 300mA と世界最高である。

多価イオン源としても使えるようにイオンの引き出しができる様になっている。

Tokyo-EBIT が電子の加速電圧 300kV、電流 300mA 以上の運転により世界最高性能を達成するためには、生成したイオンを長時間トラップするための超高真空の下で高電圧を扱うこと、超伝導磁石で電子ビームを 100 μm 以下に絞るための磁場の形と安定度、室温から液体ヘリウム温度までの変化に耐える軸精度 ($\sim 10 \mu\text{m}$)、100KW 電源の 10^{-5} 台の低リップル化など数多くの技術をクリアすることが必要であった。Tokyo-EBIT では設計から製作まですべてを日本独自の技術によって開発された。高電圧には放電という大きな難題があり、この点を克服することが本プロジェクトでも大きな課題であった。そのため、加速電圧を次第に上げ、問題を解決しながら 300kV の加速を実現した。加速電圧によってイオン化できる原子番号が決まり、300kV の加速電圧があれば、

自然界で最も重くて原子価数の大きい原子であるウラン原子を裸の原子核まで容易にイオン化できる。実際には電気通信大学ではウランは使用禁止で、使用可能な最も重い安定元素はビスマスである。

EBIT の、イオンの運動エネルギーが小さく、鋭い発光スペクトルが得られるという特徴をさらに生かすには、イオンの運動エネルギーを意図的に逃がす技術、すなわちイオンを低温化する技術が必要である。従来は軽い原子を導入しその原子をトラップ領域から蒸発させることによって、目的とするイオンの低温化を図っていた。本プロジェクトではさらにトラップ領域を形成している電界電圧をパルス的に下げて目的とする多価イオンの一部を強制的に蒸発させ、イオンの温度を下げる新しい技術を開発した。特に複雑な装置を必要としないで多価イオンの冷却ができる手法であり、その有効性が実証された^{(1)*}。

3.1.3 原子物理の解明

多価イオン(U^{91+})の1s電子の感ずる電界の大きさは 4×10^{17} V/mであり、高強度レーザーを用いて人類が作り出すことができる最大の電界をはるかに越える極限的な値である。また、そこでの1s電子の速度は光速の70%にも達することが知られており、水素イオンのそれが光速の0.7%程度であることと比べて相対論的效果を無視できない。このような状況においても相対論的量子論として最も完全性の高い量子電磁力学(QED)理論が適用できるのかは現代物理学の大きなテーマである。このような観点に立ち多価イオンを対象にスペクトルを解析し、理論との突き合わせを行った。以下に主な具体的成果を述べる。

(1) ネオン様多価イオンからのX線発光(配置混合効果)

電子の数が同じで価数が変化するイオンを系統的に調べ、いくつかの興味ある結果を得た。原子番号50から56の元素でネオンと同じ10個の電子配列を持つイオンの系列(等電子系列)について、スペクトルを系統的に調べた。その結果原子番号とともに輝線の順序が大きく変化する現象を見出した。この実験事実を電子相関効果、相対論、QED効果を加味し、多体問題を2次の摂動までを使って解く(multi-configuration Dirac-Fock法)ことによって見事に解明した⁽²⁾。

(2) チタン様多価イオンの微細構造間のスペクトル

原子番号51から78までの元素でチタンと同じ電子配列のイオンについて、基底準位の微細構造準位間の磁気双極子遷移スペクトル(可視から紫外線領域)を系統的に調べた。原子番号が60付近まではスペクトルの波長が原子番号(Z)に対し Z^{-4} の依存性を示すのに対し、60付近から80位まではほとんど変化しないことを発見した。このように通常の Z^{-4} 依存性が特定の価数以上で特異な変化をする実験事実を、電子状態の結合状態がLS結合からjj結合に移り変わる領域に特有な現象であることを理論解析により示した⁽³⁾。前項と同じく広い価数範囲の系統的实验によって初めて明らかになった特異な現象を、電子結合状態の変化として理論的に明らかにした成果への評価は高い。

* 文章中の肩付数字は6.1.の参考文献リストの番号に対応

3.1.4 多価イオン照射による表面励起の研究

本プロジェクトは原子物理究明のため以外に、将来に向けて、学際的な領域となる多価イオンの表面との相互作用を研究するテーマも実施した。多価イオンは大きな静電ポテンシャルを持ち、物質内電子のブラックホールと呼ばれる程反応性が強い。この性質を利用して、多価イオンを固体表面に静かに衝突させることによって、ナノメートルのオーダーで固体表面を改質できる可能性がある。本プロジェクトの中で、多価イオンを引き出して固体へ照射できるような装置を作り、高配向性黒鉛(HOPG)にキセノンイオンを衝突させたときの変化を走査型トンネル顕微鏡(STM)で観察した。この予備的研究の結果、表面が不活性な HOPG に隆起(ナノドット)が生じることを見だし、多価イオンの表面改質能力が大きいことを確認した⁽¹⁰⁾。

3.1.5 英国での研究成果

英国では Tokyo-EBIT より加速電圧が低く(30kV)、低価数のイオンを対象とした。また、NPL のレーザー技術との結合で高精度の分光技術を目指した。ラムシフトは量子電磁力学的効果の直接的発現であるため、しばしば「量子電磁力学試験」と呼ばれる。EBIT では価数が大きくかつ水素様電子配置を持つ単純なイオンを作り出すことができる。ラムシフト量は原子番号 Z の4乗に比例して大きくなるので、適切な測定技術により、価数が大きい多価イオンで高感度の測定が期待できる。しかし、理論的には、原子核の大きさ、形、スピン等による小さな効果が理論予測の精度を悪くしている。そのため精度良い測定技術とラムシフトの大きさを勘案して、適当な元素を選ぶ必要がある。オックスフォード大学は高精度の測定が期待できるレーザー共鳴分光法を選択し、そのレーザー波長に適合するイオンとしてシリコンの水素様イオンを対象にラムシフト測定を計画した⁽⁴⁾。しかし、レーザー共鳴分光技術、特にレーザー光源の問題から、イオン種をシリコンから窒素に変更し、レーザー光源をチタンサファイアレーザーから炭酸ガスレーザーに変更し、世界で初めて EBIT とレーザー共鳴分光の組み合わせでスペクトル測定(N^{6+} の $2S_{1/2}-2P_{3/2}$)に成功した(注: $2P_{3/2}-2P_{1/2}$ が精密に計算できるため間接的ではあるがラムシフトを測定したことになる)。実験は、レーザー技術の NPL、EBIT 技術のオックスフォード大学と本プロジェクトの日本側の研究者すべての協力で実施された。⁽⁵⁾

3.2. プロジェクト終了後の研究の継続と発展

3.2.1 EBIT 装置

Tokyo-EBIT は現在も一日に 12~14 時間稼働中であり、多価イオンと固体の相互作用の研究や高温プラズマ中の多価イオン反応の研究に活躍している。この間、CREST のプロジェクトに採択されて、装置には 3.2.3(1)に述べるような新機能を付加している。

ICORP プロジェクトの後、学術振興会拠点大学交流事業「先進核融合炉の炉心と炉工学に関する研究」の課題「原子・分子過程」の下、復旦大学近代物理研究所との交流研究を行った。その後、中国科学院が多価イオンの研究を重点領域に採り上げ、日中共同研究として Shanghai-EBIT と呼ばれる多価イオン実験装置の設計が始まり、約 3 年を経て 2004 年末に完成した。Tokyo-EBIT で培った技術を基に全面的な技術協力という形で国際協力に貢献した。

3.2.2 原子物理の解明

このプロジェクト以後、代表研究者及びオックスフォード大学で研究が継続している。日本側の基礎研究は科研費を取得して行われている。

(1) 電子と多価イオン衝突における共鳴効果

原子物理の解明のテーマでは、電子と多価イオン衝突における共鳴効果の観測を中心に展開した。核融合に代表される高温プラズマでは、2 電子励起・電離のプロセスの確率が無視できないほど大きくなることが分かり、2 電子共鳴励起、共鳴電離等の素過程の研究の重要性が認識されるようになった。電離における共鳴過程(共鳴励起二重自動電離)を重元素高電離イオン(リチウム様ヨウ素イオン)に対して初めて観測することに成功した⁽⁶⁾。また、電子ビームイオントラップ内の平衡電荷分布をトラップから引き出したイオンを計測することで、様々な元素、価数のイオンに対して二電子性再結合過程を系統的に観測した⁽⁷⁾。水素様イオンの二電子性再結合過程により放出されるX線を、結晶分光器を用いて高分解能で初めて分光測定した。二電子性の電離と再結合の過程をこれらの研究から定量的に明らかにすることができた⁽⁸⁾。

(2) QED 理論の検証

本プロジェクトの重要なテーマの一つが QED 理論の検証であった。特に英国側はラムシフトの測定を通じて QED 理論の検証を目指した。その後、本プロジェクト関係者による QED 理論の検証を直接目指した研究は行われていない。むしろ、LLNL やマックスプランク研究所のハイデルベルグ EBIT が QED 検証研究を続けている。これらの結果からは、量子電磁力学理論の矛盾は見いだせていないが、今後の EBIT のテーマとして依然量子電磁力学理論の検証という大きなテーマは意義を失っていない。本プロジェクトで QED 検証研究が継続していない理由は、本プロジェクト後に担当する研究者が居なくなったこと、Tokyo-EBIT を維持するための研究費が QED 検証テーマでは得にくかったことなどが挙げられる。

(3) 多価イオンの電子衝突断面積の有効な測定法

多価イオンによる発光は宇宙では一般的な現象であり、多価イオンの衝突現象、発光現象を理解することは宇宙での現象を理解することに繋がっている。電子とイオンの衝突断面積は、多価イオンと電子の衝突を定量的に理解する重要なパラメータの一つである。しかし、従来は、価数の高いイオンに対して交差ビーム実験を行うのに十分な強度をもった多価イオンビームを得ることが難しく、実験報告が非常に少ない状況であった。本プロジェクトでは価数を制御して生成できる EBIT 装置の特性を生かして、アルゴンの多価イオンを対象にイオンの時間発展を調べ、時間とともにより高い価数が優勢になって行く様子を明らかにした。各価数のイオンが出現するところでの成長率の傾きから衝突断面積を求める手法を開発した。最近、EBIT の中に閉じ込められた多価イオンが電子と相互作用する時に発光する特徴的なスペクトル強度の変化を解析し、重金属多価イオンの電離断面積を系統的に測定した⁽⁹⁾。これらは貴重な測定結果として注目されている。

3.2.3 多価イオン照射による固体表面励起の研究

ICORP「多価冷イオン」プロジェクトの中では予備的試行テーマであったが、その研究が発展し、「固体表面での反応現象を理解し、ナノサイズの加工技術を開発するテーマ」となり、2002 年度 CREST ナノテクノロジー分野別バーチャルラボの研究領域「超高速・省電力高性能ナノデバイス・

システムの創製」の研究課題「多価イオンプロセスによるナノデバイス創製」として採り上げられた。CREST プロジェクトの中で、EBIT から高精度でイオンを引き出せるようにビームラインの整備、増設と照射装置の建設を行い、単一多価イオンと固体表面の反応を系統的に詳しく研究した。この分野は現在、世界的に多くのグループが参入しているので、このプロジェクトでは装置の特徴と利点を生かせる高価数多価イオンを主として手がけグループの独自性を出した。すなわち、Tokyo EBIT では 1KeV から 100KeV までの電子ビームが、通常(絶縁ガス使用時には 200KeV 以上も可能)多価イオン生成に用いられるが、その運転に応じて低価数から高価数イオンを自在に得ることができる。多くの場合単一自然同位体元素のヨウ素 I の 10 価から 53 価(裸)までのイオンが本プロジェクトでは使用された。より高価数イオンに興味がある場合には Bi(裸イオンは 83 価)を用いた。このような広範囲の価数領域を用いる多価イオンのナノプロセス研究は世界に類を見ない。この系統的研究により、以下にたびたび示されるように、ナノプロセスが盛大に起る(照射効果が大い)のはヨウ素で言えば M 殻に多くの孔をもつ 30 価イオンぐらいを境にして、それより高価数域で飛躍的に増大することが判明した。これらの研究成果に対して 2003 年からの 5 年間に約 60 編の論文が生み出された。

主な成果は次の通りである。

(1) Tokyo-EBIT への新機能付加

タネ金属イオン導入に関して、従来の不安定で操作性に劣る MEVVA (metal-vapor vacuum arc ion source) に代わる方法として、K-cell (Knudsen-cell) を用いて、蒸気圧の低い元素を含むあらゆる元素の多価イオンビームの引き出しを可能にする方法の開発に成功した。機能性多価イオンの固体表面への注入を目指して、希土類元素多価イオンビームの生成を試み、ホロミウム、エルビウムなどの多価イオンの生成と引き出しに成功した。この努力により、Tokyo-EBIT は安定元素であれば周期律表上のあらゆる元素をあらゆる価数状態にし、閉じ込め引き出し得る世界に希少な装置となった。引き出したイオンビームを 2 つの照射室に導入しうる。第1室は SPM チャンバーに直結されており、多価イオン照射したサンプルを超高真空の環境を保ったまま搬送し観察することが

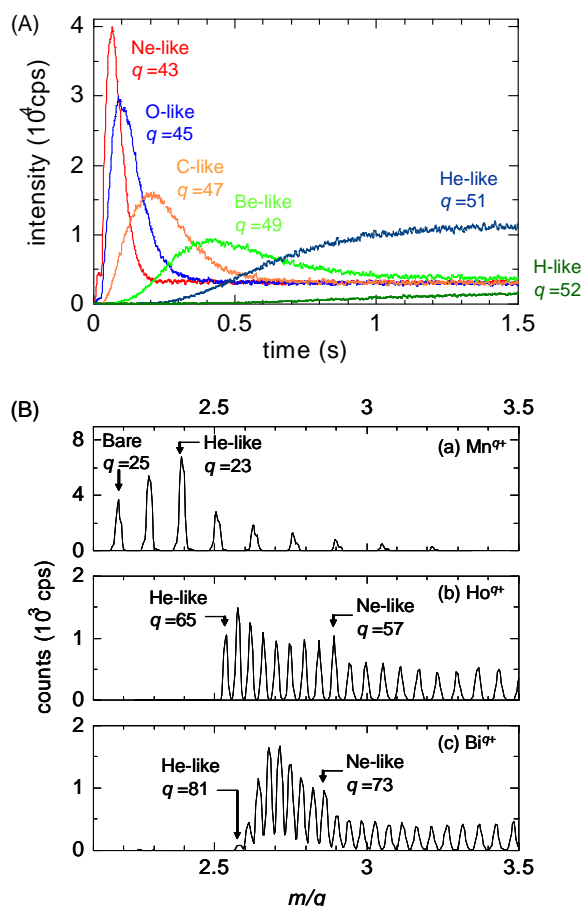


図 1: (A)イオントラップ内でヨウ素多価イオンが逐次的に生成されていく様子を引き出しイオン強度の時間変化で調べた. $t=0$ でイオン生成開始(電子ビーム ON). $E_e \sim 60$ KeV, $I_e \sim 130$ mA. (B)引き出した金属多価イオン金属多価イオン, Mn ($Z=25$), Ho ($Z=67$) そして Bi ($Z=83$) の価数分布スペクトル. $E_e \sim 60$ KeV, $I_e \sim 130$ mA.

出来る。第2室には TOF-SIMS(2 次イオン検出)、Si:Li SSD(X 線検出)、穴あき MCP(2 次電子検出)、PMT(可視光検出)、および LEED/Auger 光学系(多価イオン照射前の表面観察)を備え照射と共に起きる様々な現象を捉えることが出来る。多価イオンと固体との相互作用を研究する装置としては世界で最も充実した装置になった。

高価数多価イオン照射により表面で何が起るかを単純に見たい場合に備えて、イオン源引き出し口近くに簡素なイオン光学系をもった照射室を設けた。ここでは、例えばヨウ素なら 43 価から 53 価までのイオンを価数選別することなく混合ビームとして照射することができるようにした。イオン加速 500V から 5000V まで引き出しイオン強度は一定で約 1nA(ビーム径 0,5mm) の多価イオンビームを用いた簡便な照射実験が行える。

(2) 各種材料表面に対する多価イオンナノプロセスの物理機構の解明

酸化物表面との反応:

- 酸化物 (SiO_2 および TiO_2) に低速多価イオンを照射する際の 2 次イオンスペクトル (TOF-SIMS) について詳細な照射イオン価数依存性が調べられた⁽¹¹⁾。低価数のイオンを照射した SiO_2 では Si^+ や H^+ のみで O^+ は見られないが、高価数イオンを照射すると O^+ の収率は Si^+ のそれを超える。この傾向は +30 価程度を境に現れ、価数が増えるに従い顕著になる。また、2 次イオン収率は電子線や X 線の照射に比べ極めて大きく、1 個の高価数多価イオンの衝突によって 1 個以上の 2 次イオンが放出される。 TiO_2 でも同様の現象が見られた。
- 酸化物中の陰性の酸素が多価イオンへの電子移行によって中性化、さらには陽性化すると表面の結晶構造が不安定化し、いわゆるクーロン爆発が起きる新しいタイプの DIET(Desorption Induced by Electronic Transition) が起きていることを示唆した。
- TiO_2 の STM 原子分解能観察によって、照射痕にはヒロック型とクレーター型の 2 種あることが判明した⁽¹²⁾。

半導体表面との反応:

- Si の (111)、(100) 面の様々な処理を施した表面 ((7×7)再構成清浄表面、水素終端表面など) に対して、TOF-SIMS スペクトルの照射イオン価数依存性 (15~55 価) が詳細に調べられた。(111)-(7×7)再構成清浄表面では、30 価を超える価数で照射効果が現れ、照射痕の面積は強い価数依存性を示すことが見いだされた。照射痕は極めて浅いクレーター型構造を持ち、 I^{50+} の照射でも DAS(Dimer-Adatom-Stacking fault) 構造の 1 ステップの高さ程度の深さである⁽¹³⁾。この結果はクーロン爆発モデルを使った分子動力学シミュレーションで示されたように⁽¹⁴⁾、多価イオンとの相互作用においてイオン化する Si は、半球状に分布するのではなく、表面近傍に薄いディスク状に分布することを示唆するものである。さらに照射痕は多価イオンの一つ一つの入射に対応して生成されることが確認された。
- 水素終端した表面への多価イオン照射では、放出される 2 次イオンは Si^{n+} ($n \geq 1$) を抑えて H^+ が主要なものとなる。 H^+ 2 次イオン放出は入射イオンの価数が大きくなると共に増加するが、Si イオン収率の増加が緩やかなのに対し、水素イオンのそれは 30 価を超えるところで極めて顕著になる。さらに、コインシデンス測定による 2 次イオン放出イベントの相関を検討した

結果、入射イオンの価数が大きい場合の特徴として、 H^+ は1つの多価イオン衝突で同時に複数個放出されやすい傾向(正の相関)を示すが、 Si^+ と H^+ の同時放出は起き難い傾向(逆の相関)が見いだされた。このような相関現象はkineticスパッタリングでは見られず、ポテンシャルスパッタリングに特徴的なものである。

- Si^{n+} の収率は、水素終端表面では55価のイオン照射でも0.1程度であり、清浄表面に比べて小さい。この傾向は(111)、(100)に共通である。このことは、多価イオンが表面第一層の水素原子と強く相互作用し優先的に電子を奪うことを意味する。価数の大きいイオンの照射では、第2層で多くの Si^+ が生成されるがその下地からの電子供給により中性化されやすいことが、上述の相関現象の価数依存性の原因になっていると考えられる。
- 多価イオン照射によるTOF-SIMSは、半導体結晶のごく浅い表面領域の水素や酸素などの不純物に対して従来法にない高感度分析能力を持ち、半導体デバイス作成のための清浄表面の評価に大きな力を発揮することを示した。

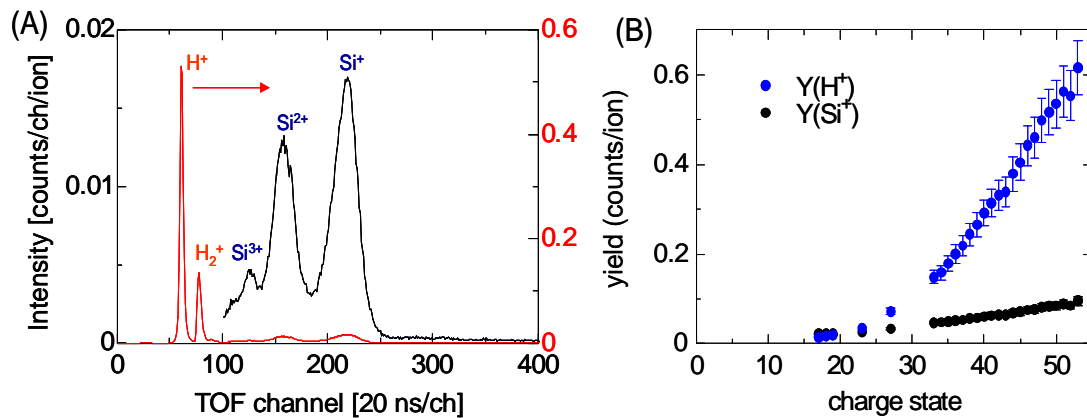


図 2: (A)Si(111)-(1×1)-H 表面に I^{50+} 衝突させ得られた TOF-SIMS スペクトル.
(B) H^+ () と Si^+ () の収率に対する価数依存性.

高配向性グラファイト(HOPG)表面との反応:

Xe の多価イオン一個による HOPG 表面改質(ナノ構造)を STM(走査型トンネル顕微鏡)で詳細に調べた。イオン照射によってナノサイズの隆起が生成される。価数によって隆起高さは変化せず(約 0.5nm)、直径は価数とともに増大(1nm ~ 10nm)した。ラマン散乱分光ではナノ構造の出現に対応したピークが得られ、その強度変化から、イオン照射によるナノ構造の生成率は入射エネルギーによらず、価数(すなわちポテンシャルエネルギー)の増加とともに大きくなることが明らかになった⁽¹⁰⁾。

金属表面との反応:

Au(111)表面に I^{50+} を照射し、2 次イオン放出率の測定と照射後表面の STM 観察から、スパッター収率および照射痕とともに観測不能な程度に小さいことが確認された。金属では多価イオンによる電子の引抜が容易に補償されて安定化されるという予想と一致した。

(3) 単一イオンナノプロセスの開発

多価イオンの固体表面との相互作用の特徴の一つは2次電子放出率の高さである。イオン衝突における kinetic effect による2次電子放出率は極めて小さいので10keV以下の入射エネルギーでは単一イオンの入射を検知することは原理的に不可能であるのに対し、多価イオンの場合は、運動エネルギーが10eV程度と小さくても、表面から電子を奪った後の緩和過程によって、極めて多くの2次電子を放出する。これを検出すれば単一イオンの入射を100%の確度で計数しうる。多価イオンビーム強度と2次電子検出イベント数、さらには照射痕の数密度の3つが極めて良い一致を示すことが確認され、2次電子検出は表面入射イベントの簡便にして確実な検出法として確立するとともに、単一多価イオンで確実に照射痕が形成されることを証明することができた⁽¹⁵⁾。

単一イオン入射が確実に検知しうることは一連の多価イオンナノプロセス研究にとって極めて有効に用いられている。例えば前節3.2.3(2)で示された多価イオン照射によるTOF-SIMS法によるスパッターイオン収率の測定でも、1個の多価イオン入射でどのようなイオン種がどれぐらいの量で、表面から放出されるかを(入射ビームのチョップなしに)直接正確に決定しうるメリットがある。光子放出を含め他の表面現象の観測についても同様である。

1個の多価イオン衝突が起こす構造変化は多くの構成原子のスパッタリングを伴い、その結果表面近傍には多くのダングリングボンドが生成される。これは化学的に安定な表面の中にナノサイズの活性点が生まれることを意味する。この事実を化学的に極めて安定な表面で知られるHOPGを標的材料にして確認した。多価イオン照射後、TBPP-CN (tertiary-butyl-phenyl-porphyrin-CN)分子を数分子層蒸着したところ、照射痕の周辺にのみ分子の吸着が見られ、その他の部分は変化がないことが、原子分解能のSTM観察で確認された⁽¹⁶⁾。

水素終端シリコン表面(Si-H)は化学的に安定で、かつ超高真空中で欠陥のないSi(100)-(2×1)-Hを作製できるゆえに、デバイス作製上価値が高い表面であるが、この表面にI⁴⁴⁺イオン照射を行って水素を優先的にスパッターし酸化処理すると、直径2~3nmの照射痕周辺に酸素が吸着したナノ界面が形成されていることが確認された。この技術は他の原子、分子との

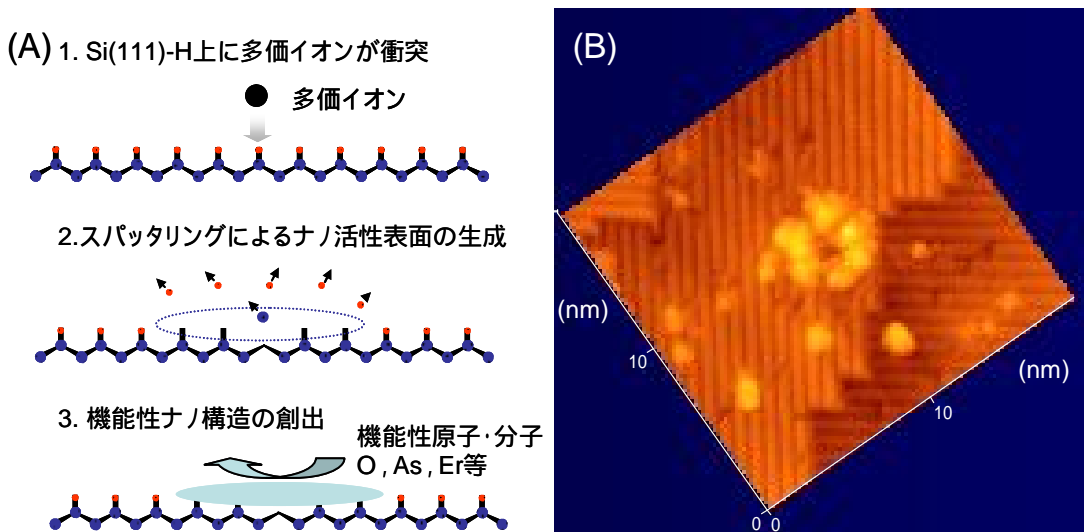


図3.: (A)単一イオンリソグラフィーの概念図

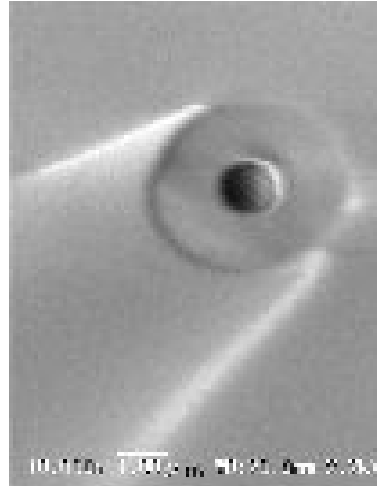
(B)Si(100)-(2×1)-H表面上にI⁴⁴⁺衝突によって生成した、酸化シリコンのナノ構造。

表面反応にも応用でき、種々の機能性を持つナノ構造を作り出す可能性を持つ。多価イオンによるナノプロセスは、広範囲かつ高密度にナノ構造を作製できる点で、STM による加工に勝る。また、数 nm サイズの加工は FIB など他の既存の方法では不可能な領域である上、価数を変えることでサイズを制御できるという大きな利点を持っている。

多価イオンビームの照射位置制御は重要な技術的課題である。2 つの方法を試みた。

- ガラスキャピラリーのイオンガイド効果を利用するために、微小開口を持つキャピラリー作製法を開発した。これまで出口径が数 100nm 径までのものの作製に成功している。イオン入射後約 40 秒でほぼ安定なイオン強度になることを確認した。出口径を一桁小さくすることを試みている。この技術研究は、理研を含め国内外で広く行われているが、高価数イオンのガイドの実現が当グループの分担課題である。
- 次項で述べる Kobe-EBIS では、 Si_3N_4 の薄膜に 100nm の穴を 300nm 間隔で配列させたものをマスクとして、接近して置いたグラファイト試料に照射して照射痕のアレーを作製した。AFM のカンチレバーのスプーンの底に微細な穴を開け位置決めのできるマスクとする試みも行っている。

(A)



(B)

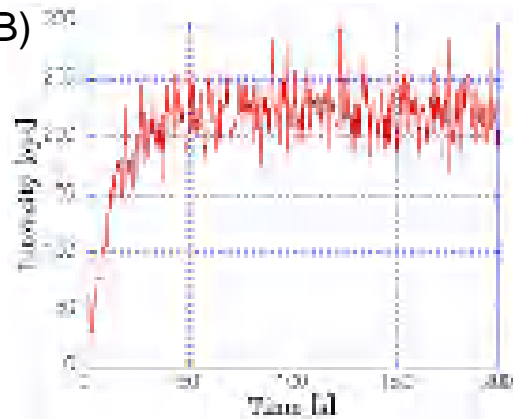


図 4: (A)作製したキャピラリーの SEM 像.
(B)ヨウ素多価イオンのキャピラリー通過特性.

(4) ナノプロセスに適した多価イオン源の開発

イオン源の開発方針: Tokyo-EBIT は分光学的研究に最適な仕様になっていて、高価数だが引き出しイオンビーム強度は低い。ナノプロセスの用途にはイオン源で生成された多価イオンを効率的に高強度のビームとして外部に取り出す必要がある。そして、多価イオンのもつ大きなポテンシャルエネルギーを X 線放射ではなく表面ナノプロセスのために有効に使われるような多価イオンの適性条件をいろいろと調べた⁽¹⁷⁾。その結果、M 殻のみに空席を持つネオン様イオンまでを用いるのが良いという結論が導かれ、最も重い安定元素であるビスマスのネオン様イオンが作れる 30keV 程度の小型の EBIS 型の合目的装置の開発に至った。

KobeEBIS の開発: 神戸大学において、ナノ加工プロセス用に操作性を重視した小型

EBIT/S (Kobe-EBIS) が開発された⁽¹⁸⁾。Kobe-EBIS では上記方針に従って電子加速電圧を 40kV (Tokyo-EBIT は 300kV) に抑える一方、ビーム強度と安定性が両立できるようなトラップ長 (200mm) を採用して EBIS 型とした。また、超伝導コイルは磁場の均一化のためにヘルムホルツ型を採用した。従来は大量の液体ヘリウムを必要としたため運転コストが高かったのに対し、その低減を目的とし、冷凍機による無冷媒型とした。また超伝導コイルを収納する真空容器を、多価イオン発生装置を収納する超高真空装置の外に同心円状に配置することによって着脱可能とし、メンテナンスを容易にした。その結果として、装置の大きさはテーブルトップサイズで、ビーム強度は Tokyo-EBIT のそれを 3 桁超える $10^8/\text{mm}^2/\text{s}$ 以上を達成したほか、製造コストは Tokyo-EBIT の 1/3 (2 機目以降は 1/5)、また運転コストは 1/10 以下に抑えられた。これらの特徴によって多価冷イオン源は産業で使える装置に一步近づいた。

4. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的、経済的な効果・効用および波及効果

4.1 科学技術の進歩への貢献

4.1.1 EBIT 装置の普及

初期には Tokyo-EBIT の他、LLNL、オックスフォード大学、NIST、マックスプランク(Berlin)のみであったが、現在はドレスデン、ハイデルベルク、ゲーテ大学、ストックホルム大学等総計 16 ヶ所(計画中を含む)にも増加した。その中で、Tokyo-EBIT は高エネルギー化への方向付けをしたといえる。すなわち LLNL の 200KeV に続く大型 EBIT(300KeV)の成功によって、その後ハイデルベルク(独、マックスプランク)、Shanghai-EBIT へと続いた。

他方、Tokyo-EBIT が示した EBIT 装置の有用性は国内での多くの小型目的別 EBIT 装置の設置を促した。Tokyo-EBIT の横に天文用のスペクトル測定用の小型装置(COBIT)が設置されている。太陽コロナ中の多価イオンのように、核融合よりも低温の領域を容易に扱うことが出来る。また、神戸大学の上記 Kobe-EBIS は CREST の研究課題に向けて表面ナノ加工に特化した装置である。今後も核融合炉のプラズマ診断用、QED 検証用、固体表面プロセス、不安定原子核の分光用など目的別の多くの EBIT/EBIS が建設されると予想される。

様々な改良とともに、液体窒素による運転を可能にした理化学研究所の EBIT もその設計には Tokyo-EBIT の研究者が関係している。前述の Kobe-EBIS は冷凍機による超伝導磁石を用いる小型 EBIS で運転コストを下げると共に、メンテナンスを容易にして、ナノ加工プロセスに必要とされる高いイオン強度を達成したという点で画期的である。東京農工大のグループは固体表面との相互作用のメカニズム解析に特化した装置を開発した。永久磁石を用いたテーブルトップの装置で、電子エネルギーは抑えているが、固体表面との相互作用において内部エネルギーと運動エネルギーのそれぞれの寄与を分ける目的ですれすれ角入射が出来るようにした。

Tokyo-EBIT の研究者が製作したものとしてはクイーンズ大学ベルファーストの EBIT も挙げられる。世界最高クラスの大型 EBIT である Shanghai-EBIT は本プロジェクトの技術を基にした日本の全面的技術協力によって 2004 年完成した。

このような EBIT 装置の普及は研究分野の拡大につながった。関連の多価イオン国際会議は現在 300 人規模の人が集まるまでになった。

4.1.2. 天文学への貢献

宇宙のプラズマ中の多価イオン由来の発光の分光学的解析のために、加速器に比べ小規模の装置でできて、ドップラー効果によるスペクトルの広がりが少ないことなどから、EBITでの比較実験が望まれている。Tokyo-EBIT は天文学分野から注目され、多価イオンの基礎データを提供してきた。X線スペクトルデータの蓄積は天文学の発展に極めて重要である。電子と多価イオンの衝突断面積は星のプラズマ温度や密度などを正確に決めることに使われる。

しかし、Tokyo-EBIT は天文学のためのデータ取得にはオーバースペックなので、天文学に関するデータ取得専用の小型 EBIT(COBIT)の製作が国立天文台と電通大グループの共同研究として実施された。国立天文台では、宇宙でのプラズマの理解のためにソーラーB「ひので」衛星を打ち上げて可視光からX線まで幅広い波長で測定して、そのデータはインターネット上で公開され

ている。COBIT では主としてコロナ遷移層で起きている「コロナ加熱」の問題に焦点を絞り、Fe の多価イオン(特に Fe^{+13}) に注目して観測データの解析を行っている。

4.1.3. 核融合開発への貢献

核融合は炭酸ガスによる地球温暖化と化石燃料の枯渇が大問題になっている現在、人類の将来を握る技術として期待が高い。多くの技術的困難のなかの一つとして、第一壁材料から不純物多価イオンが発生し、核融合を阻害する原因になることが挙げられてきた。そもそもこの問題が多価イオンを研究するニーズを生んだのであった。Tokyo-EBIT による前述の二電子励起・電離等の基礎的研究が核融合に貢献している具体例である。

日本独自の大型ヘリカル装置(LHD)で核融合プラズマ実験を行っている核融合科学研究所では、前述の COBIT に関して、自然科学研究機構の予算も利用して行う、核融合研、天文台および電通大の共同研究が 2006 年にスタートした。LHD が鋼鉄製であるため Fe の多価イオンのスペクトルの温度依存性、密度依存性を調べ LHD のプラズマ診断に使うデータを作成している。Fe の多価イオンを仲立ちにしてコロナ加熱と LHD 実験炉が結ばれている。

ヨーロッパにおいては世界各国が協力した国際核融合実験炉 ITER の建設が予定され、それに向けた多価イオン研究の解析が進んでいる。ITER の第一壁材料はタングステンが使われているのでこの多価イオンが重要な研究ターゲットになっている。マックスプランク研究所の Berlin-EBIT では冷却用に使われるクリプトンの放射冷却レートを EBIT によって詳しく調べた。ICORP の共同研究先であったオックスフォード大学でも、具体的な成果はまだ出ていないが、EBIT による多価イオン研究を核融合分野に向けつつある。

4.1.4 物理学の基礎への貢献

ICORP プロジェクトの掲げた 3 本の柱の一つが「原子物理学の観点から多価イオンの基礎的理論に貢献すること」であった。高エネルギーの EBIT 装置としてはパイオニアの LLRL の後を追う形になったが、LLRN が新しい事実を求めて一番手であろうとしたのに対して、5 年という短い期間を有効に使うために装置にとってリスクの大きい重元素よりもむしろ中程度の元素で、という代表研究者の方針は、理論と実験の両輪がかみ合った丁寧な仕事として実り、高く評価されている(6.2 参照)。多価イオンの原子構造や衝突については、従来適当な実験装置がなく理論が先行していたが、Tokyo-EBIT の高性能イオン源による等電子系列など系統的な実験と精密な計測技術が結びつき、理論と実験の検証ができるようになった。詳細は 3.1.2(1)~(2)、および 3.2.2(1)と(3)に記した通りである。

4.1.5 原子分子データベース

電子、原子、分子相互間の衝突現象は、原子・分子の種類、エネルギーの高低に跨って、自然界のあらゆる現象に関わっている。たとえば、上記核融合、天文における高温プラズマをはじめ環境化学、半導体や金属の表面プロセス技術、さらには医療に絡んで高エネルギー粒子と生体組織・分子との反応などである。従来、それぞれの分野における反応に関わるデータベースは独立に開発され、その信頼性もまちまちであった。核融合研究所が中心になって IAEA とリンクしたデータベースがあり、これを発展させる形で、国内の研究者(データ製作者)とデータ利用者が協力して「日本原子分子データベース協会」を立ち上げる動きがある。このようなデータベースは今後の

基礎科学、応用科学の基になるという意味で、戦略的な意義を持つ知的基盤である。また、そのためには多くの研究機関、研究者によって地道な作業を基に長年にわたり続けられるべき性格を持つことから、国家的な仕組みが必要な分野といえる。

本プロジェクトがこのようなデータベースに果たす(果たした)役割は、時宜にあって最先端のEBITを開発して内外の原子物理の流れの確立と拡大に貢献したこと、また、核融合研データセンターに様々な多価イオン(核融合における不純物として発生する鉄、モリブデン、タングステンなどの多価イオン)のスペクトルデータ、衝突断面積データなどを提供し、データベースの充実に貢献したことが挙げられる。自然科学研究機構の予算で核融合研、天文台、電通大を結び共同研究が2006年にスタートしたことも上記流れに沿うものであり、今後も重要なデータ形成拠点として働くものと考えられる。

4.2 研究成果から生み出された社会的、経済的な効果・効用及び波及効果について

4.2.1 プロジェクト成果から期待される技術革新・イノベーション

「原子物理」という学問分野は従来極めて基礎的な分野として見られることが多かったが、「多価冷イオン」について言えば核融合の難問に付随して(目的を持って)発展してきた。それが多くの他の分野に関連することが明らかになり徐々に学際的な分野に拡がりつつある。本プロジェクトの流れの中で、応用に繋がる取り組みと見られるものは、3.2.3 で述べたが、実用に至るにはまだ距離があり、多くの素過程の解明と基盤技術の開発が必要である。しかし、世界的にも多価イオンの応用に関する研究は関連の学会の中でも最もホットな部分になりつつある⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。プロジェクト成果とその波及効果までを含めて期待されることについて、以下にあげる。

(1) 単一の多価冷イオンによるナノ加工

現在電子デバイスの更なる微細化・高集積化に向けてデバイスサイズを10nm以下にスケールダウンすることが重要な技術的課題になっているが、トップダウン、ボトムアップいずれのアプローチも困難を抱えている。この課題に応えるべく、3.2.3の(3)において単一多価イオンナノプロセスの実証実験として、水素終端Si表面の表面吸着水素を多価イオン衝突で剥離できるレジストとして使い、Si(100)-(2×1)-H表面に2~3nm径の酸化シリコンナノ構造を作製できることを示した。水素の剥離後新しくできる界面は反応性に優れるので、この上に選択的に結晶成長を行って、径の制御性に優れるナノデバイス形成を行うことができる。また機能性の分子を付けることも出来る。さらに一分子層を形成する他のレジストを用いて他の半導体材料に発展させることも出来る。

このプロセスの特徴は、1個の多価冷イオンの衝突は100%の確率でナノ構造変化を起こすことができ、またそのイベントを2次電子によって確実に検知できること、さらに新しくできる界面の径はイオンの価数で制御できること、ナノ構造直下の基板結晶そのものには損傷を及ぼさないことがあげられる。また、イオンガイドやナノホールを配列したマスクの使用によって、一度に多数のナノ加工を行うことや、位置決めして行うことも可能になる。

この技術の実用化のために超えるべき技術的課題は多いが、その中でビームの位置制御については、イオンガイドの出口径を今より2桁程度下げることが求められる。あるいは自己組織化的に形成するナノホール配列を利用することも考えられる。またこのような用途には必然的に高いビーム強度が求められる。CRESTプロジェクトではビーム強度 $10^8/\text{mm}^2/\text{s}$ を越えるイオン源の開発に

成功したが、ますますの高性能化が求められる。

(2) 特性 X 線源としての利用

重元素の多価イオンが固体表面に衝突するとき高い確率で特性 X 線を出す。小型の装置で得られるので利用価値が高い。たとえば、

半導体のさらなる微細化のために、露光装置の波長を極端紫外光 (EUV) とする技術開発が進んでいる。この光源のために、SiMo 多層膜結晶で絞れる限界波長として、Xe と Sn の多価イオンを固体表面に衝突させたときに出る約 13nm の軟 X 線の利用が計画されている。高い輝度を要求されるので従来の EBIT は光源としては使えないが、EBIT による多価イオン発光の基礎データと高性能のイオン源の開発が求められる。そのような光源が実現すればシンクロトロン放射光設備に比べはるかに小型で低廉な設備となり、半導体産業の大きな変革ともなる。

特性硬 X 線を、従来の連続軟 X 線に代えて X 線診断に用いると非常にコントラストが上がり、癌などの早期発見に強力な手段となる。

癌細胞にドラッグデリバリー技術を使って局所的に金属重元素を送りこむことができる。その元素の K 吸収端のエネルギーに近い特性 X 線を照射すると X 線は効率的にその元素に吸収され、癌細胞とその近傍にのみ放射線効果を与えることができる。患者への負担の軽い治療法となる⁽²¹⁾。

(3) 表面分析手法

3.2.3 (2) の に記した結果によって、半導体表面に多価イオンを照射して放出される 2 次イオン分析は、表面数原子層の水素や酸素などの軽元素に対して極めて高感度なので、デバイス作製に用いる清浄表面の評価に特異な能力を持ち、半導体産業に使われる可能性がある。ただし、従来の SIMS 分析に比べて金属表面には不向きであり、定量元素分析には表面上での 2 次イオンの中性原子化の見積もりなどの課題を解決する必要がある。

(4) 新しいナノプロセス装置としての多価イオン源

上記(1)~(2)に挙げた期待される応用分野の鍵を握っているのは、高性能のイオン源であることから装置そのものが産業になる可能性がある。これまでは、原子物理の道具として研究者自身によって開発されたが、実用のためには、目的に特化した特性を持ち誰でも使えるような装置にする必要がある。学際的な分野として、企業を含め新しい人材が参加するようになって良い装置が出来れば、さらに有効性が明らかになるというサイクルができることが期待される。

4.2.2 大学や研究機関などで行われているプロジェクト成果の応用に向けた取り組み

CREST のプロジェクトの中で、神戸大学で開発されたナノプロセスに照準を定めた装置開発によって、イオンビーム強度、適切な電子エネルギーを持ち、さらに装置と運転コストの低廉化を実現することが可能であることが示された。固体表面へのナノプロセスのみでなく、上記 4.2.1 に挙げたような分野を活性化する切っ掛けとなることが期待される。このような動きは、ドイツ・ハイデルベル

グのマックスプランク研究所やドレスデン工科大学、米国のバークレー研究所にも見られ、ドレスデン工科大のようにベンチャー化に進んでいるところもある。

4.3 統計資料に見た科学技術への影響

4.3.1 主要論文の被引用件数推移について

表 1 論文リスト中の主要論文被引用件数の推移

(検索日:2007年1月12日)

年	No.2	No.4	No.5	No.13	No.82	No.39	No.37	No.66	No.71	No.58	No.9	No.1	No.35
1997	0	0	0									2	
1998	1	0	1	0							0	8	
1999	5	4	2	3							5	7	
2000	4	6	4	7		0	0			0	3	9	1
2001	1	4	6	2	1	2	1	2	0	4	6	8	2
2002	1	2	2	1	3	3	0	1	0	2	2	4	2
2003	2	4	5	2	3	4	0	4	4	0	2	5	5
2004	0	2	0	0	4	2	1	1	3	0	1	4	1
2005	1	1	0	0	2	0	4	0	1	3	1	2	2
2006	2	2	1	1	2	2	5	2	2	0	0	2	0
2007													
合計	17	25	21	16	15	13	11	10	10	9	20	51	13

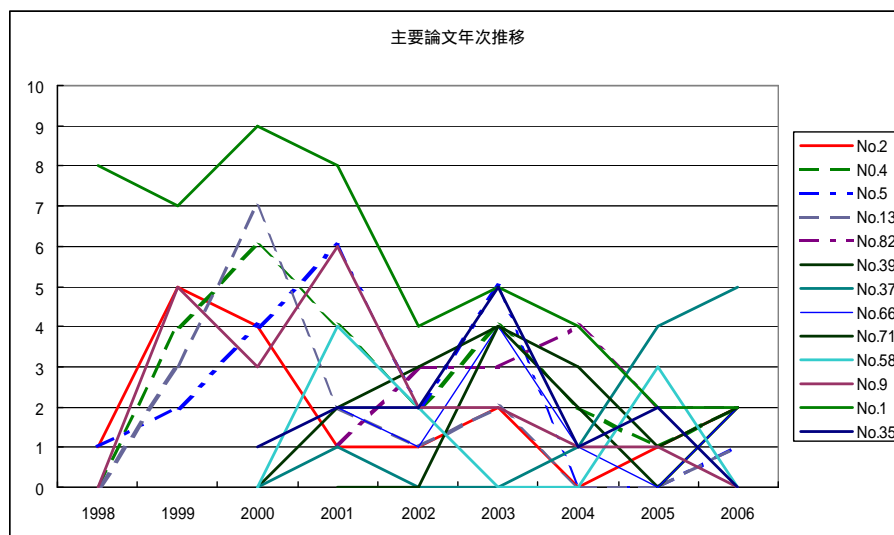


図 5 主要論文被引用件数推移

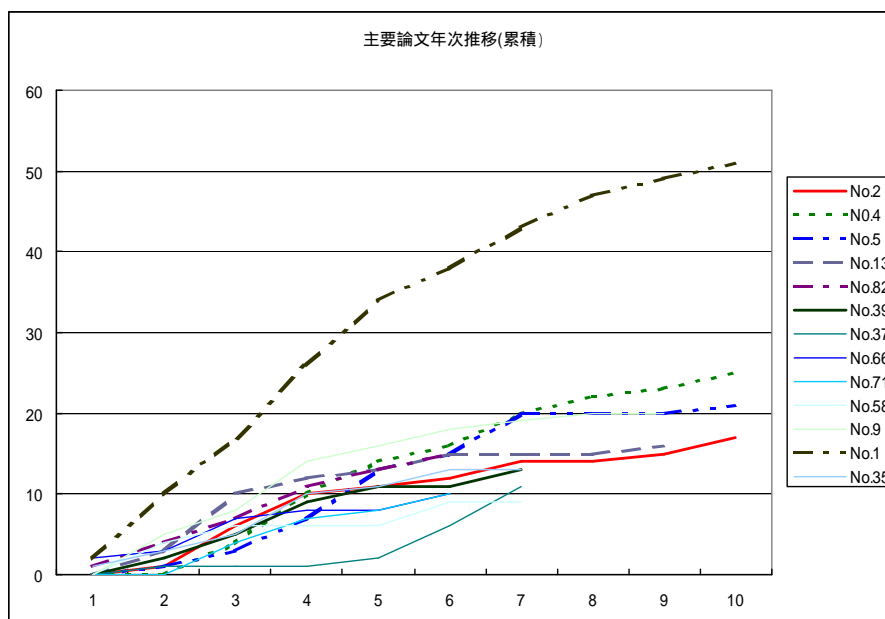


図 6 主要論文被引用件数推移(累計)

4.3.2 研究グループ別論文数の推移：キーワード検索の結果

(キーワード：EBITあるいはELECTRON BEAM ION TRAPによる)

(検索日：2007年1月25日)

年	全体	Lawrence Livermore National Laboratory	National Institute of Standards and Technology	Max-Planck- Institut	Ohtani S
1988	1	1			
1989	2	2			
1990	3	2			
1991	16	13			
1992	8	8			
1993	12	10			
1994	12	9			
1995	29	17	2		
1996	27	12	4		1
1997	38	11	2	2	7
1998	28	13	3	1	3
1999	28	16	0	1	7
2000	29	7	5	1	6
2001	47	17	2	2	10
2002	35	17	0	2	2
2003	47	18	2	10	5
2004	23	13	1	2	2
2005	46	20	1	6	1
2006	44	14	2	10	3

表 2 キーワード検索での論文発表数年次推移

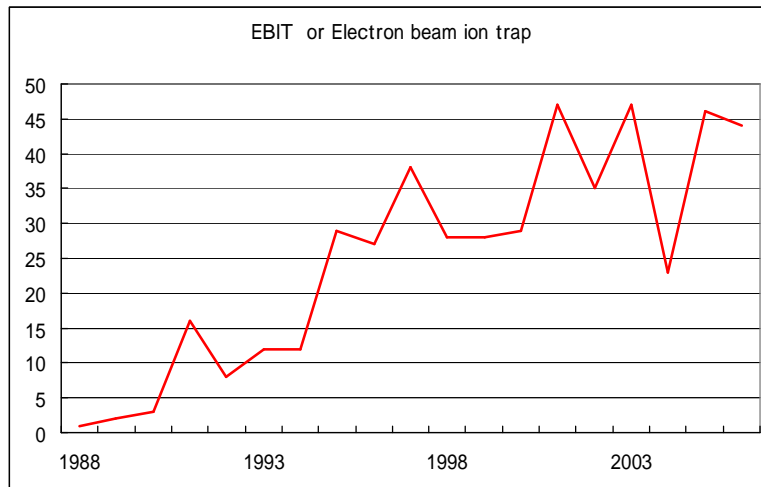


図 7 論文発表総数推移

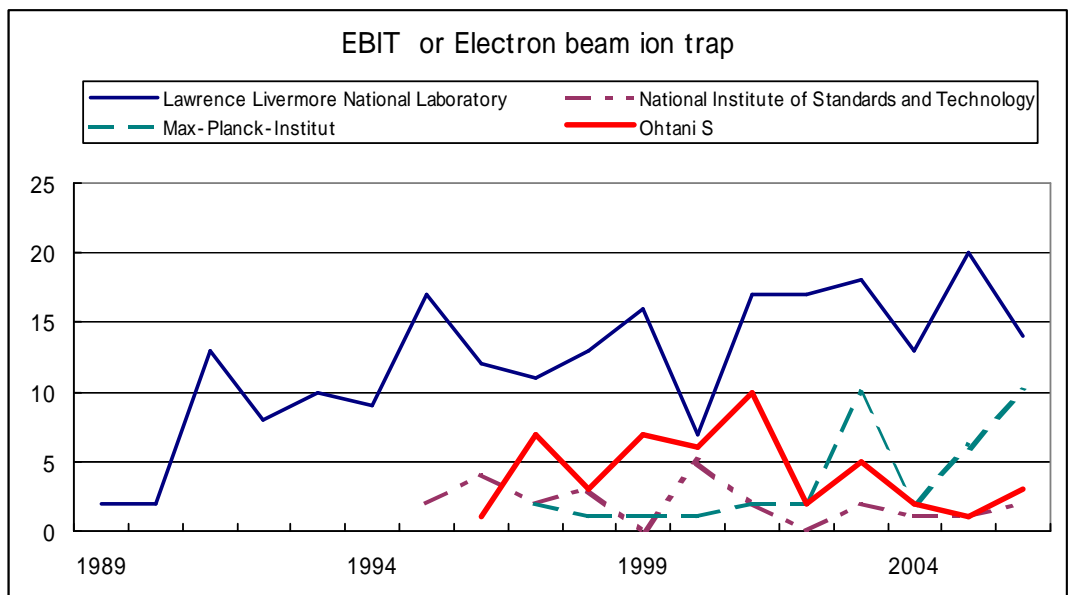


図 8 指定の機関名が入っている論文の発表数の推移

4.4 人材育成の面から見た ICORP 参加研究者の活動状況

ICORP での代表研究者の運営方針は、うまく若手の研究者をデビューさせることに繋がった。国際会議参加の機会が年 2 回あり、多価イオンの国際会議では必ず招待され、若い研究者に大きな刺激になった。その結果、プロジェクト後、国内研究機関への移籍のみならず、海外の研究機関へも移籍し、活躍している。クイーンズ大学ベルファストへは本プロジェクトの研究者が講師として雇用されたが、そこで新たに EBIT による研究を行う研究室ができた。人的交流と同時に、研究・技術が海外にも拡大した。

4.4.1 参加研究者の現況

氏名	プロジェクト参加期間	参加時の職位	現職	備考
大谷 俊介	1997.1~2002.3	代表研究者 電気通信大学 教授	電気通信大学 レーザ-新世代 研究センター 教授	
F. J. Currell	1997.8~1999.8	グループリーダー	Queens University of Belfast (School of Mathematics and Physics) 上級講師	
山田 千櫻	1997.10~2001.12	グループリーダー	電気通信大学 量子・物質工学科 教授	
中村 信行	1997.2~2001.12	研究員	電気通信大学 レーザ-新世代 研究センター 准教授	
渡辺 裕文	1997.8~2001.12	研究員	CREST 研究員	JST 海外派遣研究員としてクイーンズ大学ベルファスト(3年間)
倉本 秀治	1998.2~2001.12	研究員	トヨタ IT 開発センター 研究員	
加藤 太治	1997.5~2001.9	研究員	核融合科学研究所 研究・企画 情報センター 助手	
絹川 亨	1998.6~2001.9	研究員	神戸大学 講師	
Xiao-Min Tong	1997.4~2001.10	研究員	筑波大学 講師	
保坂 一元	1999.4~2002.3	オックスフォード大学研究員(JST・STA フェローとして参加)	産業技術総合研究所 研究員 CREST 研究員	2007 年まで NPL 研究員

4.4.2 学位取得と受賞

- 中国、レバノンからの下記2名の国費留学生在が理学博士を取得した。
Yueming Li(李 月明)、2002
Ghada Hafez El Machtoub、2004
その後、レバノンの留学生はカリフォルニア大学でポスドクとして研究に従事した。中国の留學生は北京応用数学・計算物理研究所の教授になった。なお本プロジェクト中の論文で中国人留學生研究奨励賞(野上茂吉郎記念賞)を2001年に受賞した。
- 電気通信大学の中村信行氏(当時理研所属)は2002年度(平成14年度)の原子衝突協会の若手奨励賞を受賞した。
- 代表研究者は2006年度(平成18年度)の第10回松尾学術賞を受賞した。

5. 国際研究交流による研究活動への効果

ICORP の仕組みによって英国 / オックスフォード大学と国立物理学研究所 (National Physical Laboratories, NPL) との研究協力が行われた。オックスフォード大学は低エネルギーの EBIT を持ち、Tokyo-EBIT とはイオン種の得意分野において相補的な関係にあり、両者の組み合わせにより、プロジェクト全体としては軽原子から重原子まで広く研究対象とすることができた。オックスフォード大学は元来、研究よりも教育に重点があり、またその関心は基礎物理に重心がある。オックスフォード大学との共同関係では、当初現地の装置には整備や改良が必要であり、その立ち上げのために日本側は実質上の貢献をした。一方、物理学の基礎に関わる QED 計算コードの取り扱いなどについての議論には直接その分野の大家の指導を受けることが出来た。3.1.4 に記したように英国側の主要な成果には両国の実質上の協力関係から生まれたものがある。

一方、NPL は実用化に関心がある機関であり、その意味でオックスフォード大学とは対照的で相補的に働いた。NPL の持つ優れたレーザー分光技術は本プロジェクトに貢献した。NPL にとっては、イオントラップという共通の技術対象に関心があった。本プロジェクトに参加した技術が生かされて、長時間トラップしたイオンをレーザー冷却し、イオンの遷移周波数を精密に測定することにより、時間標準精度の改善を目指し一次標準に迫る成果を上げることが出来た⁽²²⁾。英国には日本から JST の STA フェローとして研究者が派遣されたが、その後 NPL に雇用されてこのテーマに従事した。

以上のように、ICORP の仕組みによって、両国の強みを持ち寄り実質上の共同研究が出来たことが関係者の聞き取りから窺えた。研究者の往来も定期的に行われ、日本の若い研究者にとっては海外の研究者とつっこんだ議論をする得難い機会になった。参加研究者の活動状況から分かるように、本プロジェクトに関係した 4 人の研究者が海外で活躍したことは、本プロジェクトの成果の一つといえる。

6. 引用文献及び特許

6.1 参考文献

- (1) Kinugawa T, Currell F J and Ohtani S, "Pulsed evaporation cooling of ion cloud in an electron beam ion trap", *Phys Scripta*, T92 102-104 2001
- (2) Nakamura N, Kato D and Ohtani S, "Evidence for strong configuration mixing in $n=3$ excited levels in neonlike ions", *Phys Rev A*61, 052510.1-052510.5, 2000
- (3) Watanabe H, Currell F J, Kato D, Ohtani S, Yamada C, Crosby D, Silver J D and Fukami T, "Magnetic dipole transitions in titaniumlike ions", *Phys Rev A* 63, 042513.1-042513.6, 2001
- (4) Klein H A, Margolis H S, Flowers J L, Gaarde-Widdowson K, Hosaka K, Silver J D, Tarbutt M R, Ohtani S and Knight D J E, "Laser Spectroscopy of the 2S Lamb Shift in Hydrogenic Silicon", *Hydrogen atom II*, 2000, Springer Berlin / Heidelberg
- (5) Hosaka K, Crosby D N, Gaarde-Widdowson K, Smith C J, Silver J D, Kinugawa T, Ohtani S and Myers E G, "Laser spectroscopy of hydrogenlike nitrogen in an electron beam ion trap", *Phys Rev A*69, 011802(R) 2004
- (6) Nakamura N, Toriyama H, Nohara H, Kato D, Watanabe H, Currell F J and Ohtani S, "Observation of resonant-excitation double autoionization in electrical- I^{50+} collisions", *Phys Rev A*73 020705(R) 2006
- (7) Watanabe H, Tobiyama H, Kavanagh A P, Li Y M, Nakamura N, Sakaue H A, Currell F J and Ohtani S, "Dielectronic recombination of He-like to C-like iodine ions", *Phys Rev A*75, 012702 2007
- (8) Nakamura N, Tobiyama H, Nohara H, Kavanagh A P, Watanabe H., Sakaue H A, Li Y, Kato D, Currell F J, Yamada C and Ohtani S, "Resonant electron process with open-shell highly charged ion targets", Invited talk in the 13th International conference on the physics of Highly Charged Ions, Belfast UK, 2006. (To be Published in *Journal of phys. Conf. series* 2007).
- (9) O'Rourke B, Currell F J, Kuramoto H, Li Y M, Ohtani S, Tong X M, Watanabe H, " Electron-impact ionization of hydrogen-like iron ions", *J Phys B-At Mol Opt*, 34, 4003-4013 2001
Watanabe H, Currell F J, Kuramoto H, Ohtani S, O'Rourke B E and Tong X M, " Electron impact ionization of hydrogen-like molybdenum ions", *J Phys B-At Mol Opt*, 35, 5095-5103 2002
- (10) Baba Y, Nagata K, Takahashi S, Nakamura N, Yoshiyasu N, Sakurai M, Yamada C, Ohtani S and Tona M, "Surface modification on highly oriented pyrolytic graphite by slow highly charged ions", *Surf Sci* 599 248-254 2005
- (11) Tona M, Takahashi S, Nagata K, Yoshiyasu N, Yamada C, Nakamura N, Ohtani S and Sakurai M, " Coulomb explosion potential sputtering induced by slow highly charged ion impact", *Appl Phys Lett* 87 224102 2005
- (12) Tona M, Watanabe H, Takahashi S, Fujita Y, Abe T, Sun J, Nakamura N,

- Yoshiyasu N, Yamada C, Sakurai M and Ohtani S, "Observation of HCI-induced nanostructures with a scanning probe microscope", *Phys Conf Ser* 58, 331-334, 2007
- (13) Tona M, Watanabe H, Takahashi S, Nakamura N, Yoshiyasu N, Sakurai M, Terui T, Mashiko S, Yamada C and Ohtani S, "Nano-crater formation on a Si(111)-(7×7) surface by slow highly charged ion-impact", *Surf Sci* 601,723-727,2007
- (14) H-P Cheng and J D Gillaspay, "Surface Coulomb explosions: The influence of initial charge distributions", *Comput Mater Sci* 9 285-294 1998
- (15) Yoshiyasu N, Takahashi S, Shibata M, Shimizu H, Nagata K, Nakamura N, Tona M, Sakurai M, Yamada C and Ohtani S, "Demonstrative experiment for single ion implantation technique using highly charged ions", *Jpn J Appl Phys* 45, 995-997,2006
- (16) Tona M, Watanabe H, Takahashi S, Nakamura N, Yoshiyasu N, Sakurai M, Terui T, Mashiko S, Yamada C and Ohtani S, "Nano-fabrication on a Si surface by slow highly charged ion impact", *Nucl Instr Meth B*, 256, 543, 2007
- (17) Watanabe H, Takahashi S, Tona M, Yoshiyasu N, Nakamura N, Sakurai M, Yamada C and Ohtani S, "Dissipation of potential energy through x-ray emission in slow highly charged ion- surface collisions", *Phys Rev A*74, 042901, 2006
Watanabe H, Sun J, Tona M, Nakamura N, Sakurai M, Yamada C, Yoshiyasu N and Ohtani S, "X-ray emission in collisions of highly charged I,Pr,Ho,and Bi ions with a W surface", *Phys Rev A*75 062901 2007
- (18) Sakurai M, Nakajima F, Fukumoto T, Nakamura N, Ohtani S and Mashiko S, "Development of an electron beam ion source for nanoprocess using highly charge ions", *Nucl.Instrum.Meth B*235 519-523 2005
- (19) 小特集「多価イオン原子過程の基礎と拡がる応用研究」 *J Plasma Fusion Res*, 83 658-697 2007
- (20) Gillaspay J D, Pomeroy J M, Perrella A C and Grube H, "The potential of highly charged ions: possible future applications" *J Phys Conf Ser* 58 451-456 2007
- (21) P.Kavanagh A, Gillaspay J D, Hirst D G, Mendenhall M H, Nakamura N, Ohtani S, Watanabe H and Currell F J, "Radiation from K-shell filling in highly charged ions: a driver for resonant combination cancer therapy?" *Phys Conf Ser* 58 439-442 2007
- (22) Margolis H S, Barwood G P, Huang G, Klein H A, Lea S N, Szymaniec K and Gill P, "Hertz-Level Measurement of the Optical Clock Frequency in a Single ⁸⁸Sr⁺ Ion", *Science* 306 1353 2004.

6.2 特許

No.	パテントファミリーおよび特許番号	【発明の名称】	【出願国】	【出願番号】	【出願日】	【発明者】および【発明者 / 出願人】(米国のみ)	【出願人】	【公開番号】	【公開日】	【特許番号】	【登録日】
1	A-1	多価イオン発生源およびこの発生源を用いた荷電粒子ビーム装置	日本国特許庁	特願2004-296890	2004/10/8	櫻井 誠、中高 史晴、福本 卓典、中村 信行、大谷 俊介、益子 信郎	科学技術振興機構			なし	
2	A-2	MULTIVALENT ION GENERATION SOURCE AND CHARGED PARTICLE BEAM APPARATUS EMPLOYING SUCH GENERATION SOURCE (多価イオン発生源およびこの発生源を用いた荷電粒子ビーム装置)	世界知的所有権機関 国際事務局	PCT/JP2005/007284	2005/4/8	櫻井 誠、中高 史晴、福本 卓典、中村 信行、大谷 俊介、益子 信郎	科学技術振興機構			なし	
要約		多価イオン発生源は、電子源4とイオン閉じ込め領域となるドリフトチューブ5とコレクタ6とからなるイオン源電極3と、イオン閉じ込めのための超伝導磁石11と、イオン導入手段20、22と、さらにイオン源電極3を収容した第1の真空容器2と、超伝導磁石11を収容した第2の真空容器10と、第1の真空容器及び第2の真空容器にそれぞれ配設した真空排気装置15、16とで成る。第1の真空容器2と第2の真空容器10は着脱可能であり、極高真空が必要なイオン源電極3のみを容易にベッキングできる。									

7. おわりに

旧称、科学技術振興事業団(JST)で採り上げる理工学系のプロジェクト研究は、科学技術の工学応用を指向するテーマが大きな部分を占めていた。その中で ICORP「多価冷イオン」プロジェクトは例外的に基礎科学的テーマを主体としている。一種の特異点的な存在であった。

もともと多価イオンは太陽コロナの観測で発見され、天体には一般的に存在する粒子として認められるようになった。そして、地上の実験室プラズマでも高温化が進むとともにその存在がクローズアップされはじめ、多価イオンの挙動が天体や地上の高温プラズマに重大な影響を及ぼすことが指摘された。そこで多価イオンの原子物理学的性質の理解が必須とされ、その研究に火が付いた。世界的規模で多価イオンの研究が隆盛となった中で、多価イオンは相対論、量子電磁力学の検証にとって極めて適した素材として注目され、最も基礎的な研究分野である原子物理学の進展に貢献するようになった。ICORP「多価冷イオン」プロジェクトはまさにこの動向の中に生まれた。

このような多価イオンを題材とする基礎研究の中から、その粒子がもつ極めて大きい反応性にも注目が集り、その性質を利用したナノテクノロジーへの応用研究が広く行われるようになった。そのひとつの現れとして「多価冷イオン」プロジェクトからひとつの分枝的研究として CREST「多価イオンナノプロセス」研究が行われたのである。そして、低速多価イオンと表面との相互作用の理解が進み、多価イオンは新しいツールとして、またプローブとしてナノテクノロジーの進展に極めて有用な粒子であると認められるようになった。

一方、多価イオンと表面との相互作用の本質は、(サブ)フェムト秒時間内に起る多電子過程が支配している、と理解され、そこに注目する研究が、以前とは違った領域での新しい原子物理学を切りひらく恰好の研究テーマになるとの期待が高まりつつある。

他方、技術的視点に立つと、この一連の研究の中で、簡便で扱いやすく廉価な「高価数多価イオンビーム発生装置」の開発が進んだのは、言わば必然であり、歓迎すべき流れである。現在では、少額の研究費によりこの装置を入手あるいは製作できる。興味をもつ研究者がこのイオン源を用いて容易に多価イオンの研究を行うことができる。そのようにして分野の学際化が進む中で、真に使える技術としてのナノテクノロジーが生まれることが期待される。一方で一部の研究者は、プロジェクトの後半に芽が出てこれから育つことが期待される上述の短時間、多電子の動的過程を原子物理学的観点から新しく展開していくことである。

このように、多価イオンは、ひとつの研究素材として、その居場所が天体、プラズマ核融合、基礎原子(量子)物理、表面物理、反応化学、ナノテクノロジーなど、基礎科学から工学応用までの分野を時代とともに行きつ戻りつしながら、その中で新しい学問分野を産み出してきた。その意味で JST の研究プロジェクトとして進展した多価イオンの研究は、歴史的観点からも極めて興味深い学際的な研究動向を作ってきた、とすることができる。