

3.3 社会インフラ

わが国を取り巻く社会的課題は刻々と顕在化しており、これらの課題に対応するために必要とされる社会インフラ需要も質的に大きく変化しつつある。例えば、道路等の事故が相次いでおり、今後インフラが一斉に更新期を迎え、維持補修・更新に係る投資が発生することが想定される。さらに、大規模自然災害等については、平成 25 年 12 月に「国土強靱化基本法」が成立し、国土強靱化に関する施策を総合的かつ計画的に推進することとされた。水の浄化技術、大気汚染、温室効果ガス、水素社会の到来は世界規模の重要課題であり、効率的な液体・ガスの分離・精製技術の必要性は論を俟たない。電力の将来的課題としては、超伝導直流送電による送電ロスの減少も検討されている。また、原発事故に伴う放射線の影響をできるだけ早く減らしていくことも官民の責務である。

そこで、生活のライフラインである水、電力、交通、通信などを想定した社会インフラの項目を新設し、今後ナノテクノロジー・材料が特に貢献しうる、構造材料、水処理膜、センサデバイス、超伝導送電、放射線除染・減容化を本報告書では取り上げた（これらは当然、エネルギー分野、情報通信分野とも重複する）。

ICT 等の高度技術を駆使した新しい社会インフラのあり方として、ソフト・ハードの両面を併せた社会を官民連携しながら構築していくことが求められる。

3.3.1 構造材料

3.3.1.1 構造材料 (金属系)

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

金属系構造材料に関して、高強度、高靱性、軽量 (高比強度)、耐環境性 (耐熱性、耐食性など)、易加工性など材料特性の向上、および高品質、低コスト、高生産速度など製造プロセス技術の向上を目指す研究開発領域である。強化、破壊、腐食の機構を解明し、材料開発の指導原理を見出し、さらにそれらをもとに使用環境下での寿命予測法を確立する。また、(単純形状の) 一次素材のみならず最終形状に近い素形材をも、高品質、低コスト、高生産速度で製造する技術を確立する。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景と意義]

構造材料は、構造物がその構造および機能を維持すべく、自重および荷重に耐えるために必要な力学的特性を有する材料である。特に鉄鋼をはじめとする金属系構造材料は人類の歴史で最も長く使用され、今もなお幅広い機能、高い性能が求められ続けている。近年では東日本大震災を一つの契機として、構造材料には、災害に耐えて社会インフラを支え、エネルギー効率を高めて資源を節約し、環境負荷を下げて持続性を維持するための機能、性能の向上がより一層求められ、国家主導の技術開発政策が次々と打ち出されている。

[これまでの取組み]

従来の金属系構造材料の結晶粒径は小さくても 10 μm 程度であったが、これを一桁以上小さくすることにより、様々な特性が現れることが近年明らかになってきた。例えばアルミニウムの結晶粒径を制御することにより、鉄鋼と同程度の強度が得られ、さらに、靱性もある程度達成できることが示されている。

日本は、鉄鋼、軽金属ともにナノスケールでの微細組織化、ナノ材料の添加などで世界最高性能を誇る。例えば、ナノスケールの析出物を鋼中に分散させることにより強度を大幅に増加させたナノハイテンが市販されている。一方、欧米は軽金属メジャー企業を有し、航空・宇宙・防衛産業において依然として研究開発から産業化まで優位性を保っている。ロシアは航空・宇宙産業に強みがあり、アルミニウム、チタンに関する技術も保有していることから、今後の動向が注目される。中国、韓国は製品化のコスト競争で優位に立ち、さらに、自前の素材開発に注力しつつある。軽金属では、ロシアとカナダにおけるアルミニウムの生産量が米国を上回っており、固溶強化、析出強化型の東南アジア、インド、イランなどのアジア圏も追い上げ傾向にある。

[今後必要となる取組み]

金属系構造材料設計は、これまで実験に基づく経験則を中心に行われてきたのが実状である。しかし、実験のみから導き出される特性は飽和状態に近づきつつある。全ての金属系構造材料について、製造・加工時の熱的・機械的履歴により材料組織が変化し、さらに諸特性、使用時のパフォーマンスも変化する。その履歴と使用条件のあらゆる組

み合わせを、実験により再現することは過大のコスト、時間を要する。革新的な材料を短時間で産み出すために、材料設計、製造プロセスともに、計算科学、情報学（インフォマティクス）などを積極的に導入すべきである。

ただし、計算科学の重要度が増す一方で、計測・評価技術の進歩が不要となるわけでは決してない。進歩の方向性の一つが微細構造に向かうことは確かである。構造材料開発に長期間を要する原因は、疲労、クリープ、応力腐食割れ、水素脆化など、時間依存性の破壊現象にある。巨視的な破壊が起こるまでに何十年もかかる場合もあり、それをより短時間で把握するために、微視的兆候を捉えることが有効と考えられる。また、もう一つの方向性としては、材料の状態を三次元で把握することが挙げられる。それは三次元アトムプローブ、FIB-SEM などのように微細構造解析に限らず、中性子線による三次元の残留応力測定、多軸応力場での力学特性評価など、より巨視的な計測・評価も含まれる。部材の形状、荷重、拘束の条件が複雑化する状況において、単純な機械的試験のみから部材のパフォーマンスを予測することには無理がある。これらのデータがデータベースに蓄積されることにより、材料開発のより一層のスピードアップが期待される。

(3) 科学技術的・政策的課題

大学、公的研究機関においては、金属系構造材料に取り組む研究者、特に若手研究者層の薄さが最も懸念される。一方、素材産業においては、市場がグローバル化し、海外、特に新興国のメーカーが競争力をつける中、国内企業の統合が進んではいるが、産学官連携、オープンイノベーションなどの国家政策に十分に協調しているとは言いがたい。例えば鉄鋼メーカーは高い技術開発力を持ち、大規模な高炉一貫鉄鋼プロセスを扱う。他の市場が確立された金属材料についても概ね同様のことが言える。彼らの技術開発に大学、公的機関が直接的に貢献することは易しくないのが実状である。これは日本のみならず海外にもあてはまり、例えば素材産業において日本の技術力に肉迫する中国、韓国の場合、代表的な国立材料研究機関である中国科学院金属研究所(CAS-IMR)、韓国材料科学研究所(KIMS)の研究対象に鉄鋼材料関連はほとんどない。これは鉄鋼業界が高い技術開発力を備えているからであり、例えば韓国の浦項製鉄(POSCO)が自ら浦項工科大学(POSTECH)を創立して鉄鋼材料研究を一手に引き受けている。一方、非鉄金属（アルミニウム、チタン、マグネシウム、ニッケル基合金）に関しては、産業がまだ発展途上であり技術開発力がないために、国立研究所が産学官連携の中で技術開発の主導的役割を担っている。CAS-IMR、KIMS とともに、材料開発から鋳造、圧延などのプロセス技術開発まで行う。

ただし、先進国には金属系構造材料に関する産学官連携のテーマはないか、といえは否である。その例を NIST に見出すことができる。彼らは NIST 自動車軽量化センター(NCAL)という、自動車メーカー（トヨタ、ホンダ含む）、素材メーカー（鉄鋼、化学など）から成るコンソーシアムを設立し、部材パフォーマンス評価などで主導的立場にある。NIMS など日本の公的研究機関にも、同様のことができないはずがない。産学連携に適したテーマとして、部材パフォーマンス評価・寿命予測、先端計測、異種材料接合などが検討に値する。実際、NIMS では平成 26 年度に構造材料研究拠点が発足し、その中で、構造材料つくばオーブンプラザ(TOPAS)が産学官連携のプラットフォームとなる。

(4) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

[新たな技術動向]

第一原理計算、分子動力学法、熱力学計算、フェーズフィールド法、有限要素法などを組み合わせて駆使し、原子・分子レベルのナノスケールから、ミクロを経て、部材レベルのマクロスケールまでを結び付けようとする、いわゆるマルチスケール解析の有効性が顕在化しつつある。また、その計算には相応のデータベース、併せてそこから有用なデータを抽出するデータマイニング技術なども重視されている。

製造技術に関しては、少量多品種生産への適応がトレンドの一つであるが、その際に歩留まり向上の要件の一つとなり、ネットシェイプまたはそれに準じるニアネットシェイプの成形加工技術が重視される。従来からある鋳造、鍛造などに加え、粉末冶金の発展形としての射出成形、三次元積層造形などが有望視される。また、次世代自動車に求められる、車両のより一層の軽量化と安全性の両立からマルチマテリアル化は必須であり、そのための異種材料接合技術がキーテクノロジーとなる。例えば、摩擦攪拌溶接(FSW)が代表的だが、金属とCFRPの接合においては、接着剤の使用も視野に入る。

[注目すべきプロジェクト]

- ・科学研究費新学術領域研究「バルクナノメタル」(平成22年度～)では、マトリクスを構成する結晶粒や相の大きさが1 μm 以下であるバルク形状の多結晶金属を対象とする研究開発が進められている。
- ・JST 産学共創基礎基盤研究「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」(平成22年度～)は、微視・巨視双方のレベルでのヘテロ(不均一)構造を積極的に活用して、次世代金属構造材料開発への道筋を作ろうとするものである。
- ・JST 先端的低炭素化技術開発(ALCA)「耐熱材料・鉄鋼リサイクル高性能材料」(平成23年度～)では、低炭素化社会の実現に向けた、主に発電・輸送機器用蒸気・ガスタービン等のための耐熱材料・コーティング技術開発が推進されている。
- ・文部科学省「元素戦略プロジェクト〈研究拠点形成型〉」(平成23年度～)は、希少元素を用いない材料開発を目指すものであり、構造材料に関しても、京都大学構造材料元素戦略研究拠点が設立された。拠点形成により、協働が進みにくい材料創成と電子論との連携を図ることを大きな特徴としている。

さらに、産業化に向けた出口戦略を重視した、材料技術開発プロジェクトとして、次の2つが挙げられる。

- ・経済産業省未来開拓研究「革新的新構造材料等技術開発」(平成25年度～)は、自動車をはじめとする輸送機器の抜本的な軽量化を目的として、鉄鋼、非鉄金属(アルミ、チタン、マグネシウム)、CFRPおよびこれらの接合技術の開発を行う。本プロジェクトの推進のために、「新構造材料技術研究組合」(ISMA)が設立され、鋼材、アルミニウム、チタン、マグネシウムの材料・プロセス・接合技術開発に関して19企業、1独法が加入した。

- 平成 26 年度に開始される内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的構造材料」では、耐熱合金、金属間化合物等がセラミックスコーティング、航空機用樹脂、FRP とともに研究開発項目として挙げられている。この中では航空機エンジン用部材としてニッケル基合金、チタン合金、チタンアルミの加工技術開発などが行われる予定である。全 26 採択課題のうち、2 拠点を含む 8 課題が耐熱合金・金属間化合物等領域に属する。

(5) キーワード

高強度化、軽量化、耐熱性、計算科学、情報学、異種材料接合

(6) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	超微細粒材料、周期構造Mg合金、微細析出組織材料などのシーズ技術の研究が鉄鋼・軽金属ともに盛んに進められている。鉄鋼では、マルテンサイトなどの従来型ナノ組織材料の解析が進んでいる。文部科学省「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築」、「元素戦略プロジェクト(京都大学構造材料元素戦略研究拠点)」の研究成果も期待される。
	応用研究・開発	◎	↑	経済産業省未来開拓研究「革新的新構造材料等技術開発」による自動車向け材料(鉄鋼、Al, Ti, Mg)軽量化(高比強度化)、内閣府SIP「革新的構造材料」による航空機エンジン向け耐熱材料(Ni, Ti, TiAl)の材料・プロセス技術開発。
	産業化	◎	↑	ナノサイズの析出物によって強化した鉄鋼をナノハイテンとしてJFEスチールが製品化した。自動車向け高級鋼板として競争力強化に寄与している。ナノ炭素材料の大量合成技術の産業化が活発に行われているものの、これを用いた産業化は導電性などの機能材的使用が主流で、構造材料用途への展開は目立った進展が乏しい。
米国	基礎研究	◎	→	・2011年に発表されたMaterials Genome Initiativeは、材料開発全般において計算科学、情報学を活用して、新材料の開発から実用化までの期間・コストの削減しようとするもので、構造材料分野も視野に含まれる。 ・エジソン溶接研究所(EWI)による摩擦攪拌溶接(FSW)などの異種金属接合技術開発。
	応用研究・開発	◎	↑	原子力材料技術などの開発では、依然として他国をリードしている。エネルギーに加えて、軍用の材料技術開発(高強度、軽量化、耐熱性)が多く行われているはずであるが、表には出にくい。
	産業化	○	↑	・鉄鋼企業の競争力は高くないものの、軽金属(特にアルミニウム)企業の組織微細化技術は高い。
欧州	基礎研究	◎	↑	・ナノスケールフェライト-マルテンサイトDP鋼、超微細粒材料などの開発で日本と同等レベルにある。 ・独マックスプランク鉄鋼研(MPIE)、シュツットガルト大学など、鉄鋼材料を主な対象とする計算材料科学、マルチスケールシミュレーションに関して日本に勝る。
	応用研究・開発	◎	↑	・独の連邦政府ファンディングによる自動車向けマルチマテリアルシステム技術開発プログラム。 ・英国接合溶接研究所(TWI)による摩擦攪拌溶接(FSW)などの異種金属接合技術開発。
	産業化	◎	↑	自動車用鋼板などの開発で高い技術をもつ。独、仏に拠点を有する企業が産業を牽引している。

中国	基礎研究	△	↗	第12次5カ年計画において政府としてナノ技術に関する高強度、軽量化材料の研究開発費を大幅に増加している。特にアルミニウムやマグネシウムなど航空用合金材料およびナノ高強度、軽量化材料に集中している。
	応用研究・開発	◎	↗	米国と同様に、軍需利用が大きなニーズの一つとなっている。自動車の国産化に対応できる微細組織鉄鋼の開発を目指している。中国科学院金属研究所(CAS-IMR)は、軽金属(Al, Ti, Mg)の材料・プロセス・加工・接合技術開発に約50人の研究者を充てている。
	産業化	◎	↗	規格化・標準化などを戦略に掲げ、自国で評価技術を確立する動きが活発化している。鉄鋼, Ni, Al, Ti, Mgなどの主な金属材料の生産量は世界一である。
韓国	基礎研究	△	↗	日米欧のレベルには達しないものの、超微細粒材料研究などでは高いレベルの研究が行われている。応用研究を優先して行う方針が強く、第二次科学技術基本計画により基礎研究水準は向上してきている。
	応用研究・開発	○	↗	TRIP鋼の開発研究は日本とともに高いレベルを持っている。韓国材料科学研究所(KIMS)は、軽金属(Al, Ti, Mg)の材料・プロセス・加工・接合技術開発に約50人の研究者を充てている。
	産業化	○	↗	自動車向けMg合金シートは世界に先駆けて量産化に入った。ナノ組織制御は日本などとの共同研究を推進している。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向

(7) 参考資料

- 1) 物質・材料研究機構. “社会インフラ材料研究の新たな展開：安全・安心な持続性社会の構築へ向けて”. 2012. NIMS 調査分析室レポート.
- 2) 特集・鉄鋼材料を活かすナノ組織制御技術. ふえらむ (日本鉄鋼協会会報), 2007, 12 (12), p.748-794.
- 3) 文部科学省科学研究費補助金「バルクナノメタル」: <http://www.bnm.mtl.kyoto-u.ac.jp/>
- 4) JST 産学共創基礎基盤研究プログラム「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御」: <http://www.jst.go.jp/kyousou/theme/h22theme01.html>
- 5) JST 先端的低炭素化技術開発(ALCA): <http://www.jst.go.jp/alca/index.html>
- 6) 新構造材料技術研究組合(ISMA): <http://isma.jp/index.html>
- 7) JST 戦略的イノベーション創造プログラム「革新的構造材料」:
<http://www.jst.go.jp/sip/k03.html>
- 8) 米国マテリアルゲノムイニシアチブ(MGI): <http://www.whitehouse.gov/mgi>
- 9) NIST 自動車軽量化センター(NCAL): <http://www.nist.gov/lightweighting/>
- 10) エジソン溶接研究所(EWI): <http://ewi.org/>
- 11) マックスプランク鉄鋼研究所(MPIE): <http://www.mpie.de/>
- 12) シュツットガルト大学材料試験研究所(MPA)、材料試験・材料科学・材料強度研究:
<http://www.mpa.uni-stuttgart.de/index.en.html>,
<http://www.imwf.uni-stuttgart.de/index.en.html>

- 13) 英国接合溶接研究所(TWI) : <http://www.whitehouse.gov/mgi>
- 14) 中国科学院(CAS)金属研究所 (IMR) : <http://english.imr.cas.cn/>
- 15) 韓国材料科学研究所(KIMS) : <http://www.kims.re.kr/eng/>
- 16) 浦項工科大学(POSTECH) : <http://www.postech.ac.kr/>

3.3.1.2 構造材料（複合材料）

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

複数の異なる材料の複合化により、高比強度（引張強さ/比重）など、均質材料では達成できない機械的特性を発揮し、構造物の軽量化等に貢献することを目指す研究開発領域である。その代表である FRP（繊維強化プラスチック）においては、繊維、樹脂おのこの開発に加えて成形技術の開発が活発化し、加工性、生産性等の向上と併せて製造コスト低減を追求している。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景と意義]

省エネルギー、低環境負荷（CO₂ 排出量削減）という地球的課題に対して、軽量構造材料は自動車、航空機をはじめとする輸送機器などへの適用により、その解決に直接的に貢献する。代表的な複合材料である FRP は、マトリックスとしての樹脂の中に強化材としての繊維が配置された、高比強度、すなわち強く軽い構造材料である。さらに、構造物にかかる荷重の分布に合わせて強化材を配置することが可能である、効率的な材料でもある。しかし実際には高価格であり、併せて加工性、生産性などにも難があることから、まだ金属系構造材料ほど普及していない。

逆にいえば、鉄鋼をはじめとする金属材料の開発が成熟に至る一方、炭素繊維複合材料（CFRP）技術開発は、特にプロセス技術開発にまだ大きな伸びしろを有している。炭素繊維にはアクリル繊維を使用する PAN 系、ピッチを使用するピッチ系があるが、いずれも日本発の技術であり、その生産量において日本は世界のおよそ 7 割を占める。世界の需要は 2013 年には 48 千トン/年であるが、2015 年には 70 千トン/年、2020 年には 140 千トン/年、という見通しもある。この炭素繊維を用いた CFRP は今後、自動車・航空機産業に革新をもたらす、産業・社会にパラダイムシフトを引き起こす可能性が高い。

[これまでの取組み]

日本の FRP の出荷量は 1960 年代後半から徐々に増加し、1996 年にはピークの 479.5 千トンに達したが、その後は減少を続け、2009 年以後 200 千トン台を低迷している。一方、世界の総出荷量（2008 年）はおよそ 8.6 百万トンで、そのおよそ 4 割が米国、3 割が欧州、3 割がアジアと言われている。アジアの中で最も出荷量が多いのは中国（1.6 百万トン）で、年成長率も日本よりはるかに高い。国内生産の FRP の需要として最も大きいのは浴槽・浴室ユニットなどの住宅機材であり、生産量全体の約半分を占め続けている。他に建設資材、輸送機器、浄化槽などがある。そのほとんどは GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）である。GFRP の成形法は、1980 年代にはほぼ確立されていた。1980 年にはハンドレイアップ法、スプレーアップ法が主流で、FRP 成形法全体のおよそ 5 割を占めていたが、その後モールドイングコンパウンド法の割合が増加し、現在およそ 5 割を占めている。前述の住宅機材にもこの成形法が使用されている。

CFRP（炭素繊維強化プラスチック）は、プリプレグ（強化繊維の織物に樹脂を含浸させたシート状の中間基材）をオートクレーブ（圧力釜）にかけるという成形法が代表的である。高性能だが高価であるため、その主な用途はスポーツ用品、航空機等に限定さ

れる。ボーイング 787 の機体構造重量の 35%が日本メーカーの製造する CFRP であり (CFRP 全体が機体構造重量の 50%)、CFRP 製造においても日本は高い国際競争力を有してきたが、欧州が次世代航空機の製造技術 (自動化等) の研究開発を着々と進めており、日本は遅れをとっている。また、2013 年 11 月にドイツ BMW 社は、世界で初めて CFRP を車体の主要骨格に採用した電気自動車「i3」を一般向けに発売しており、日本に先行する形となっている。

なお、複合材料には金属、セラミックスをマトリックスとする金属基複合材料(MMC)、セラミックス基複合材料(CMC)もあり、1980 年代のいわゆる新素材ブームの中で多くの研究開発がなされたが、有力な商品は生まれず 90 年代のバブル経済崩壊とともにほとんどの企業は撤退した。有望な材料としては SiC/SiC コンポジットが、Ni 基超合金を超える耐熱材料として、次世代航空機エンジンのタービン翼への適用が期待されている。

[今後必要となる取組み]

炭素繊維の製造において、アクリル繊維を空气中高温で耐炎化 (焼成) するため、製造エネルギーおよび CO₂ 排出量のいずれもが鉄の約 10 倍である (1 トンの炭素繊維をつくるのに、20 トンの炭酸ガスがでる)。自動車用材料等として、より広く社会に普及するためには原料、製造プロセスの抜本的な見直しによる製造エネルギーおよび CO₂ 排出量の大幅低減が求められる。

FRP の製造においては、プリプレグ、オートクレーブを用いる方法は、生産に長時間を要し、かつ設備投資も大きい。さらに、曲率半径が小さいとプリプレグ積層体に層うねりやしわが発生し、さらにこれらに起因してボイドや繊維配向乱れが発生し、生産性低下や部材不良率上昇を招きやすい。オートクレーブ法自身の技術開発課題としては、製造工程の短縮化、成形品の寸法精度向上などが挙げられる。一方、より高生産性かつロバストな生産技術として、脱オートクレーブ成形法の技術開発も志向すべきである。

航空機体向けなどの大型部材向け生産ライン、大量生産に対応した自動化技術、検査技術においても、欧米に遅れをとっており、キャッチアップが求められる。

CFRP の航空機、自動車への本格的な適用はまだ始まったばかりで、その破壊過程、耐久性、耐衝撃性などに関して得られた知見は不十分である。材料の健全性の評価・検査技術の開発と併せて、そのデータを蓄積、解析する必要がある。

将来、機体、車体の部材が大幅に CFRP に置き換われれば、従来の金属材料を前提とした構造設計が根本から見直されるはずである。ただし、金属材料が全て CFRP に置き換わる状況は考えにくい。鉄鋼、アルミニウム、チタンなどの異種材料を組み合わせる構造を作るマルチマテリアル化の傾向は必至であり、そのための異種材料接合・接着技術もキーテクノロジーとなる。

(3) 科学技術的・政策的課題

複合材料の研究開発においては、構造物設計と材料設計が一体となって行われることが多く、研究者も機械工学系が多い傾向にある。しかし更なる高性能化のためには繊維/樹脂界面の解析・制御をはじめとする、ナノ・ミクروسケールでのアプローチが重要であり、材料科学工学系との協働の促進が求められる。

また現時点では日本は米欧に後れを取っており、ユーザー産業、素材産業の協働の促進を政府が強力に支援すべきである。

(4) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

[新たな技術動向]

前述の脱オートクレーブ成形法の一つとして、RTM 成形法 (Resin Transfer Molding: 樹脂含浸) が挙げられる。これは繊維のみを予め積層し、その後に樹脂を含浸させるので高価なプリプレグが不要となる。RTM 成形法は 1970 年代に既に国内において確立されたが、その発展形である VaRTM 成形法 (真空樹脂含浸成形法) は低温で樹脂含浸を行うもので、より低コスト化が可能となる。一方、素材である樹脂についても、従来は主に熱硬化性樹脂が使用されてきたが、今後は射出成形、スタンピング成形等、各種成形法に比較的対応しやすく、かつ長時間の硬化工程も不要な熱可塑性樹脂の使用が高生産性の確立に有効であると考えられる。

検査技術としては、構造ヘルスマニタリング技術が注目されている。これは光ファイバセンサなどを CFRP 複合材料製造時に埋め込み、製造時、使用時のひずみ、振動、温度変化、損傷などをリアルタイムで検知・診断するもので、航空機認証機関による認証取得の段階にまで達している。

[注目すべきプロジェクト]

- ▶ 経済産業省「革新炭素繊維基盤技術開発」(平成 23 年度～) 炭素繊維製造時の消費エネルギー消費量・CO₂ 排出量の半減及び生産性の大幅向上(大量供給)を実現する、新たな炭素繊維製造プロセスに必要な基盤技術を確立することを目的としている。
- ▶ 経済産業省「次世代構造部材創製・加工技術開発 (複合材構造)」(平成 25 年度～) は、航空機用 CFRP 構造ヘルスマニタリング技術の実用化や製造プロセスモニタリング技術の開発を進めている。
- ▶ 経済産業省未来開拓研究「革新的新構造材料等技術開発」(平成 25 年度～) では、自動車をはじめとする輸送機器の抜本的な軽量化を目的として、より広く、鉄鋼、非鉄金属 (アルミ、チタン、マグネシウム) とともに CFRP およびこれらの接合技術の開発を行う。CFRP に関しては、量産車の超軽量化のための熱可塑性 CFRP(CFRTP)の開発を行っている。本プロジェクトの推進のために、「新構造材料技術研究組合」(ISMA)が設立され、CFRP に関して名古屋大学をはじめ 1 大学、17 企業が加入した。
- ▶ 内閣府戦略的イノベーション創造プログラム「革新的構造材料」(平成 26 年度～) では、航空機用樹脂、FRP がセラミックスコーティング、耐熱合金・金属間化合物等とともに研究開発項目として挙げられている。この中では航空機エンジンファンケース・ブレード向け CFRTP、航空機機体構造用の脱オートクレーブ成形技術、大型部材成形技術などが行われる予定である。全 26 採択課題のうち、1 拠点を含む 6 課題が航空機用樹脂・FRP 領域に属する。

(5) キーワード

複合材料、炭素繊維、CFRP、CFRTP、熱可塑性樹脂、高比強度、軽量化、脱オートクレーブ、低コスト化

(6) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 物質・材料研究機構による、繊維/樹脂界面の解析・制御研究。 大学、独法による、CNTベースのナノコンポジットによる高性能化の研究開発。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 経済産業省「革新的新構造材料等技術開発」、内閣府「革新的構造材料」による、CFRTP成形技術開発、脱オートクレーブ成形技術。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ボーイング787の機体構造重量の35% (全体50%) を製造。 東レがボーイング、帝人がエアバスに供給。 東レが2014年から3年間で炭素繊維・繊維事業に1300億円投資。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> Materials Genome Initiativeの下で計算材料科学による材料設計が進んでいる。 CNTなどを用いたナノコンポジットなどの基礎研究。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> デラウェア大学複合材料センターによる、各種成形技術およびそれを前提とする材料設計技術、生産ライン最適化技術の開発。 エジソン溶接研究所(EWI)による、金属-CFRPの接合・接着技術の開発。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ボーイング787が機体重量の50%にCFRPを採用。 開発を目指す次期ボーイング777X主翼にCFRPを採用し、米国内で製造予定。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ナノコンポジット、ナノ強化繊維強化プラスチックの研究への巨額の公的投資。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 独連邦教育研究省(BMBF)のファンディングによる「マルチマテリアルシステム」における複数構造材料の組み合わせによる車体軽量化技術開発。 フラウンホーファー化学技術研究所(ICT)による、各種成形技術およびそれを前提とする材料設計技術の開発。 フラウンホーファー生産技術・応用マテリアル研究所(IFAM)による、大型部材の生産・検査自動化技術、接合・接着技術 (異種材料間含む)の開発。 英国溶接接合研究所(TWI)による、金属-CFRPの接合・接着技術の開発。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 独BMWが2014年5月、炭素繊維の生産能力を現状の3倍である年産9,000トンにすると発表。昨年発売した、CFRPを全面的に採用した量産型電気自動車 (EV) 「i3」の受注が1万台を超え。国外への販売も開始、今後の需要拡大に対応。 エアバスがA350XWBの胴体、機体にCFRPを本格採用。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 大学、国研によるCNT、炭素繊維複合材料に関する基礎研究。研究ポテンシャルの上昇著しい。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 1960年に国家建材局の下に4研究所が設立、1999年に組織改革し、企業活動を開始。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> FRP生産量は2000年に日本を抜き、中国複合材料工業協会(CCIA)は2020年には6百万トンに達すると予想 (現在の3~4倍)。 大型旅客機の国産化の計画があり、それに合わせて炭素繊維の国産化を推進。 現在の主な用途は建材、輸送機器 (自動車・鉄道車両、枕木など)、エネルギー (風力発電ブレード、パイプ)。

韓国	基礎研究	△	→	・他国に比べて顕著な活動・成果が見えない
	応用研究・開発	○	→	・韓国材料科学研究所(KIMS)による、大型FRP部材（風力発電ブレードなど）の性能評価。
	産業化	○	→	・炭素繊維の生産系列設置が進む。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↓ : 下降傾向

(7) 参考資料

- 1) “新版複合材料・技術便覧”. 2011. 強化プラスチック協会、日本複合材料学会.
- 2) “社会インフラ材料研究の新たな展開：安全・安心な持続性社会の構築へ向けて”. 2012 . 物質・材料研究機構.
- 3) 武田展雄, 水口周, 伊藤悠策「先端複合材料構造の成形モデリングおよびモニタリングの最近の動向」日本機械学会論文集 (A 編) 78 巻 795 号 (2012-11) .
- 4) 武田展雄, 越岡康弘「航空宇宙木複合材構造の構造ヘルスマニタリング技術の進展」、「非破壊検査」(日本非破壊検査協会誌) 第 60 号 3 号, 2013.
- 5) S. Minakuchi, T. Umehara, K. Takagaki, Y. Ito, N. Takeda, Life cycle monitoring and advanced quality assurance of L-shaped composite corner part using embedded fiber-optic sensor, Composites: Part A 48 (2013) 153–161
- 6) 新構造材料技術研究組合(ISMA) : <http://isma.jp/index.html>
- 7) JST 戦略的イノベーション創造プログラム「革新的構造材料」 : <http://www.jst.go.jp/sip/k03.html>
- 8) デラウェア大学複合材料センター(CCM) : <http://www.ccm.udel.edu/>
- 9) エジソン溶接研究所(EWI) : <http://ewi.org/>
- 10) フラウンホーファー化学技術研究所(ICT) : <http://www.ict.fraunhofer.de/en.html>
- 11) フラウンホーファー生産技術・応用マテリアル研究所 : <http://www.ifam.fraunhofer.de/en.html>
- 12) 英国接合溶接研究所(TWI) : <http://www.whitehouse.gov/mgi>

3.3.2 水処理用分離膜

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

水処理における分離対象物質の性状や分離の目的に適した分離膜の開発を対象とした研究開発領域である。分離膜の工学的性能（分離性能、水透過速度、強度、加工性、安定性）の向上を目指した研究開発が進められている。また最近新たな概念に基づく革新的な分離膜が提案されてきている。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景と意義]

水の需要が近年世界的に増加する中、水資源の確保は世界的に喫緊の課題となっている。また、金属資源やオイルサンド、シェールガスなどの化石資源の採掘・採取は地下水汚染や汚染水の排出といった環境問題を引き起こしている。このような世界的な水不足・水環境問題を解決する手段としては、膜技術がその根幹をなすものと言え、膜を用いた水処理は現在非常に多くの関心を集めている。

膜分離プロセスを用いた水処理技術は、逆浸透膜（RO 膜）による海水淡水化、精密ろ過膜（MF 膜）/限外ろ過膜（UF 膜）による浄水処理、MF/UF/RO 膜による廃水処理および再生水処理に大別できる。

2025 年には水ビジネスは 100 兆円市場にも発展すると言われている。日本の膜産業が世界において優位にある今こそ、次世代型の膜材料や膜プロセスの開発に選択的に資金と人材を集中し、さらに一歩先に進むための取り組みが望まれる。

[これまでの取り組み]

日本の膜メーカーは積極的に膜の開発を推進し、信頼性の高い優秀な膜を多数開発してきた。例えば RO 膜については、日本の 2 つの企業が競い合うように、塩の阻止率と水の透水性能を向上させた膜の開発を行ってきた。また別の日本企業は、中空糸タイプの RO 膜を開発し、サウジアラビアを中心に多くの市場に導入している。また MF 膜については、日本膜メーカーの 1 社は機械的強度と化学薬品に高い耐性を有するポリフッ化ビニリデン（PVDF）に着目し、独自の技術により多孔膜の開発を行ってきた。現在世界のトレンドはこの PVDF 製 MF 膜に追従する方向に向っている。

大学の取り組みに関しては、約 10 年前までは、膜の透過機構の解明や膜を用いたアプリケーションの探索が中心であった。しかし、数年前から革新的な膜そのものの開発に焦点が置かれるようになってきた。例えば、タンパク質を用いた超高速ろ過膜やナノカーボンを用いた分離膜、あるいは、正浸透膜（FO 膜）として用いる水チャネル導入脂質二分子膜などである。

世界には膜開発の研究拠点が数多く設立されているが、最近まで日本にはそのような拠点は形成されていなかった。日本における基礎研究から実用化に至る開発の基盤形成が望まれていたが、2007 年神戸大学に日本初となる先端膜工学センターが設置された。また最近では信州大学にアクア・イノベーション拠点が形成されている。

米国では膜素材に関する研究から膜の工業化に至る幅の広い研究が行われている。コロラド大学には 20 年以上の歴史を持つ膜センターが設置されている。この他イェール大

学、テキサス大学、ペンシルバニア州立大学、トレド大学などで研究が活発である。また高濃度塩溶液の浸透圧を駆動力とする FO 膜に最近特に関心が高まっているが、米国ではこの FO 膜に関して Hydration Technology Innovation 社、Oasys Water 社、Porifera 社等のベンチャー企業が多く設立されている。

欧州では、伝統的に基礎研究が盛んである。オランダのトゥエンテ大学には世界を代表する研究グループがあり、ドイツではアーヘン工科大学やエッセン大学、フランスではモンペリエ大学、英国ではインペリアルロンドン大学、ベルギーではルーベン大学で研究が盛んである。

中国は基礎研究から産業化まで急速にレベルが向上している。排水基準の厳格化が応用研究を後押ししている。浙江大学や南京工業大学には大規模の膜センターが設置されており、また産業界では 100 社をはるかに超える膜メーカーが設立されている。

韓国の動向としては、RO 膜に関する大型のプロジェクト (seaHERO) や水処理に関する大型プロジェクト (Eco-Smart Waterworks System) の影響もあり、膜の研究が非常に活発である。2014 年 7 月に中国で開催された世界膜学会 (ICOM2014)において、中国の次ぎに参加者が多かった国は韓国であった (日本は 3 番目)。

シンガポールでは、National University of Singapore (NUS) 及び Nanyang Technological University (NTU) において、研究が非常に活発である。特に NTU には大規模な膜センターが設置されている。NUS では特徴的な中空糸膜や FO 膜の開発に注力しており、NTU では、バイオフィウリングに関する基礎研究も盛んである。産業界では、Hyflux 社を中心に、海外プラントの受注が盛んである。

現在水処理膜分野での日本の膜メーカーは高い競争力を維持している。しかしながら中国、韓国、シンガポールなどのアジア勢の追い上げも激しく、引き続き日本が世界の水処理技術をリードするためには、この分野の研究開発をさらに活発化させる必要がある。

[今後必要となる取組み]

膜を用いた水処理の最大の問題の 1 つは、膜操作中に孔の目詰まり等により膜性能が低下する現象 (膜ファウリング) である。膜ファウリングの抑制についてはこれまで数多くの研究がなされてきたが、ファウリング機構の解明や抑制については、現在でも完全には達成されているとは言い難い。これは、膜ファウリングに影響を与える因子が非常に多いことに起因する。膜側の因子 (膜の親水・疎水性、孔径、多孔度、膜表面粗さ、膜表面ゼータ電位等) と処理水側の因子 (ファウラントの種類、ファウラント濃度、ファウラントサイズ等) のかけ算によりファウリングが決定されるため、影響を与える因子は無数に存在する。そのため、ある水質の処理水に対してファウリングを有効に抑制していた膜が、他の水質の処理水に対しても有効とは限らない。これまでのファウリングの検討では、市販の膜を用いて、単一の処理水について検討を行うといったケーススタディ的な研究が数多く行なわれてきている。しかし、ケーススタディの積み上げだけでは本質的な解明には至らない。今後は膜ファウリングに関して数多くの系統的なデータを蓄積し、どのような成分の処理水に関しては、どのような材質や構造の膜が最適であるかといった設計指針の確立が重要である。そのためには、1 研究室の規模を超えた

より大きな組織による総合的な実験的検討と、ファウリング現象のシミュレーションといった理論的検討をさらに強化する必要がある。低ファウリング膜の開発を成功させた国が、世界において次の水ビジネスをリードすると言っても過言ではない。

これまでは、多孔膜は主に高分子溶液の相分離法により、また RO 膜は界面縮重合法に作製されてきた。今後は、膜性能（透水量、シャープな分画性、高強度等）の更なる向上を目指して、新たな膜材料の導入や膜作製方法の確立に向けた開発を精力的に推進していく必要がある。例えば、ナノカーボンや金属有機構造体（MOF）といった空間空隙制御材料や、アクアポリンに代表される水チャンネル（タンパク質）を導入した膜の開発に、今まで以上に取り組む必要がある。これらの膜では、現状の膜の透過性と比較して、2 桁以上優れた透過性を達成できる可能性を秘めている。またオイルサンドやシェールガスの採取に伴って排出される廃水には高濃度の油分が含まれており、浄化に必要なコストはエネルギーコストにも影響を及ぼすと想定されることから、このような廃水にも対応できる疎水性物質耐性のある水処理分離膜の開発が重要である。日本においては、この様な有機溶剤に耐える膜の開発にはあまり焦点が当てられていなかったが、今後は無機膜（ダイヤモンド様カーボン膜等）や有機—無機ハイブリッド膜の開発を通して、高いロバスト性を達成する必要がある。

最近、次世代の水処理技術として FO 膜法が注目されている。海水淡水化において現在主流である RO 膜法では、水流束の駆動力として浸透圧よりも高い圧力を海水側に負荷させる必要がある。一方 FO 膜法では、海水よりも高い浸透圧を有する高浸透圧溶液（駆動溶液：Draw Solution, DS）を用いれば、海水側から DS 溶液側に自発的な水透過が起こるため、究極の省エネルギー海水淡水化プロセスが可能となる。また海水など高濃度塩水と河川水などの淡水間の浸透圧差を利用した浸透圧発電の研究も進められている。このような FO 膜プロセスの実現には、FO 膜プロセスに特化した高性能の膜の開発が重要である。従来の市販 RO 膜を FO 膜プロセスに適用した場合は、高い透水量は得られない。これは、RO 膜があくまで RO 操作に最適な膜に設計されているためであり、今後 FO 膜プロセスのための膜の開発をさらに活性化する必要がある。FO 膜プロセスの実現に不可欠なもう一つの開発要素は、DS 物質の開発である。現状は世界各国がしのぎを削ってこの DS 物資の開発に注力している。FO 膜プロセスの鍵を握るとも言える DS 開発に関しては、世界において日本が一步出遅れた状態にある。今後 FO 膜プロセスの実現に向けて、我が国においても DS の開発に早急に取り組む必要がある。FO 膜を用いた水処理プロセスは、従来の RO 膜プロセスとは全く概念の異なる革新プロセスである。日本の先導的な技術推進のもとで、革新プロセスの実現を目指すことが望まれる。

(3) 科学技術的・政策的課題

分離膜材料は、実プロセスで性能と耐久性を示す必要がある。従って有望な材料に対してこのようなプロセスでの評価を行いつつ、同時により基礎的な、素材の選択や構造の制御あるいは革新的な製造手法の開発を行う必要がある。このような基礎と応用の連携研究は、JST 等でも実用化研究として実施されているが、通常、実用化に結びつかない開発案件が圧倒的に多くなっている。本研究開発領域においてこのような状況を改善するためには、目的分野に応じた分離膜材料の工学的性能（分離性能、水透過速度、強

度、加工性、安定性)を明確にし、それを達成する材料を創製するとともに、目的分野における実証試験を繰り返す必要がある。

膜材料をはじめとする高分子材料の分野は、化学産業界との連携を強め始めてはいるが、高分子教育、特に物性物理学や化学工学の教育が十分に行われていない。高分子物性は、高度な基礎科学の一つであるが、材料科学としての重要性が十分に認知されておらず、その教育を企業に依存しているのが実状である。大学における高分子研究がサイエンスの先端研究に偏っており、技術の空洞化が起こりつつある。また、応用研究を担う人材が不足しているため、米国のように製品化と結びついた基礎研究も展開しづらい。高分子の基礎教育と同じく、実用化も企業まかせという風土を変える必要があり、従来のサイエンスに重点を置いた研究プロジェクトのみならず、実用化を見据えたプロジェクトを立ち上げる必要がある。

分離膜による水処理の研究開発では、基礎から応用まで広範な学術領域、技術領域からの知見をもって総合的に取り組む必要があり、このような取り組みを可能とする研究拠点の形成が不可欠である。世界では、そのような研究拠点の形成が急速に進んでおり、日本においても研究拠点の形成と整備が急務である。

(4) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

[新たな技術動向]

従来の分離膜に代わる新しい分離膜として、我が国においてフェリチンを用いた超高速ろ過膜、ダイヤモンド様カーボン膜、あるいはグラミシジン A を水チャンネルとして用いた脂質二分子膜の開発が行われている。特に水チャンネル導入脂質二分子膜の開発では、これまで高い阻止率が得られていなかったが、最近非常に高い塩の阻止率を示しながら、市販膜と比べて 2 桁程度高い水透過性を示す膜の開発が報告された。

FO 膜の開発については、中空糸形状の膜を中心に非常に活発に報告がなされている。この分野では特にシンガポールが精力的であり、前述の NUS や NTU では、競うように、高い水透過性と高強度を有する膜の開発を報告している。我が国においても FO 膜に用いる支持体構造を有効に制御した膜が開発されている。FO 膜プロセスで用いる DS 物質の開発についても多くの新材料が創出されている。例えば感温性高分子、磁性体微粒子、あるいは Switchable polarity solvent (CO₂/Air 吹き込みによる再利用) 等である。このような FO 膜や DS 物質の今後の研究開発の動向が注目される。

[注目すべきプロジェクト]

JST の CREST では 2009 年度に研究領域「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」が発足し、多くの水処理プロジェクトが進行中である。文部科学省の革新的イノベーション創出プログラム (COI) では、「アクア・イノベーション拠点」が 2013 年度に採択され、信州大学、長野県、企業との共同で、ナノカーボンなどを用いた耐久性のある水分離膜の開発、分離膜などのモジュール化、プラント量産化、ビジネス化などに取り組んでいる。また、地域イノベーション戦略支援プログラムとして、神戸大学や兵庫県を中心に「革新的膜工学を核として水ビジネスにおけるグリーンイノベーションの創出」のプロジェクトが進行中である。

さらに NEDO の省水型・環境調和型水循環プロジェクトにおいて、膜透過加圧エネルギー等の削減を目指した RO 膜、NF 膜の研究開発が行われている。また国土交通省では MBR (メンブレン・バイオリアクター) の国内での本格的な普及や海外への展開を図るため、A-JUMP プロジェクトを実施した。さらに下水道施設のコストを大幅に削減し、省エネルギー・創エネルギー効果の増大に寄与する革新的 MBR (膜分離活性汚泥法) 技術について、実規模レベルの施設を設置して実証を行う B-DASH プロジェクトが進行中である。さらに 2013 度に終了したものの、内閣府の最先端研究開発支援プログラムの 1 つとして「Mega-ton Water System」の研究プロジェクトが実施されてきた。

世界の動向としては「Desalination and Water Purification Research Project」(約 5 億円、米国)、「National Centre of Excellence in Desalination Australia (NCEDA)」(約 40 億円、オーストラリア)、「Eco-Smart Waterworks System」(約 75 億円、韓国) 等、大規模プロジェクトが多く実施されている。またシンガポールでは水不足の高い危機感を反映して、特に数多くのプロジェクトが進行中である。

(5) キーワード

逆浸透膜、限外ろ過膜、精密ろ過膜、正浸透膜、多孔性材料、ナノ細孔、ファウリング、メンブレン・バイオリアクター、水チャンネル、脂質二分子膜、ドロソリユーション

(6) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	ナノテクを活用した新素材や革新膜の研究が次第に増えてきている。FO膜やDSの研究は最近やや活性化の兆しが見える。ファウリングの低減や水質評価に関する研究が、大学を中心に盛んになってきている。
	応用研究・開発	○	→	RO膜、ナノフィルター(NF)膜、MF膜、UF膜の技術開発水準は依然として高い。MF膜、UF膜は韓国、中国に押されつつある。FO膜については国内企業では実用化されていない。
	産業化	○	→	RO膜、NF膜は産業としても優位を保っているが、MF膜、UF膜は、性能及び品質では優れているものの、安価な韓国製、中国製にビジネスで押されている。国内の膜利用水処理施設の建設が活発ではないため、アジア各国に進出しているが、採算面は厳しいと思われる。またMF、UF膜では浄水処理やMBRに関して米国への進出も活発である。
米国	基礎研究	◎	↑	膜素材に関する研究に参入する大学・研究機関の数が益々増えている。CNTやアクアポリンを応用した膜だけでなく、ナノファイバー上に界面重合でポリアミドを形成するという研究や耐塩素性を高めたRO膜の開発も発表されている。また、RO膜内部の透過現象のシミュレーション研究など米国ならではの研究も行われている。
	応用研究・開発	○	↑	FO膜の開発について、Hydration Technology Innovation社、Oasys Water社、Porifera社等のベンチャー企業が多く設立されている。
	産業化	◎	↑	Dow Chemical社は、傘下に収めたOmexellのUF膜を前処理にしたRO膜とのIMS提案で市場に攻勢をかけている。NanoH2O社がポリアミド複合RO品・乳製品・飲料など特殊用途を中心に事業を進めている。GEは産業用水処理に軸足を置いている模様。米国では、海水淡水化は環境問題を理由に進展が止まっているが、下水再利用は益々盛んである。
欧州	基礎研究	◎	↑	MEDINAプロジェクトを中心にEU全域において、分離膜及び分離プロセス及び脱塩技術の価値評価等の研究が盛んに行われている。オランダやドイツでは、特殊パターン形状膜の研究やファウリングの研究が盛んである。

	応用研究・開発	○	↗	RO膜、NF膜の技術開発は弱い、UF膜、MF膜の技術開発は盛んであり、新たな膜及びモジュールが開発されている。
	産業化	◎	↗	BASF社がInge社を、Pentair社がNorit社を傘下に収め、巨大資本を背景にした水処理事業を展開し始めており、Siemens社を追っている。Lanxess社がRO膜エレメントの工場を建設しており、Dow社同様、イオン交換樹脂事業とのシナジー効果を狙っている模様。
中国	基礎研究	○	↗	膜研究の実力が上がってきている。水処理においては、原水の汚染が激しいため、AOP等の分解技術の研究レベルが向上している。
	応用研究・開発	○	↗	排水基準の厳格化に伴い、下水・産業廃水再利用の技術開発が盛ん。各開発区で、官学産の連携が進んでいる。
	産業化	○	↗	ヴォントロン社など、RO膜、NF膜の性能は向上しているものの、海外勢に追いつくところまでではない。UF膜、MF膜については国内に100社以上の会社があり、低価格を背景に事業拡大をしている。膜天、立昇、美能は、膜性能も悪くなく、シェアを伸ばしている。下水再利用プラントが特に多く、海水淡水化プラントも増えてきている。
韓国	基礎研究	○	↗	SeaHEROプロジェクトを元に、多くの大学が膜素材から水処理の研究をしているが、レベルはまだ高くない。最近大型プロジェクト(Eco-Smart Waterworks System)がスタートしている。FO膜研究、ファウリング研究など精力的に行っている。
	応用研究・開発	△	↗	技術導入が多く、自社開発は少ない。SeaHEROの海水淡水化デモプラント計画は、漁業者の反対により、うまくいっていない様子。MBRによる廃水処理施設が多く建設されている。
	産業化	○	↗	Woojing Chemical社が低価格を背景にシェアを伸ばしているが、東レが買収。Koolon社などがUF膜で市場に参入開始。大手エンジニアリング会社Doosan社は、中東を中心に海水淡水化大型プラントを受注、急速に拡大している。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、 ○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、 × : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗ : 上昇傾向、 → : 現状維持、 ↘ : 下降傾向

3.3.3 高温超伝導送電

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

高温超伝導ケーブルによる安定した無損失送電の実現を目指す研究開発領域である。高温超伝導材料の結晶性や化学組成、電子状態と臨界電流特性の関係など、安定利用の基本となる超伝導現象の分野横断的な理解に加え、これらの設計や制御、および通常電力供給システムとの効率的で安全な接続を可能とする要素技術、長距離のケーブルを長期間効率的に冷却するシステム技術の確立などの研究開発課題がある。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景と意義]

エネルギー分野における現在の課題は、電力供給の増大をエネルギー効率の向上と電力の脱炭素化を同時並行的に可能とする技術開発である。発電－変電－送電－配電－需要家に至る電力供給の中で、我が国における送配電ロス約 5%であり膨大な電力が熱となって失われている。世界平均は約 8%であるが、発電量が急伸している途上国（インドなど）では 20%以上損失している国もあり、送電システムの拡大と同時に送配電効率の改善が切望されている。

超伝導ケーブルは、ロス零で送配電可能な技術を提供できる。また、従来の金属導体（銅やアルミニウム）を用いる送配電技術では断面積当たりの通電電流密度は約 $1\text{A}/\text{mm}^2$ にとどまり、大電力の供給には高電圧化が必要であったが、超伝導ケーブルにより低電圧・大電流化の方向が可能となる。導電材料・電気絶縁材料・金属製保護材料で構成される電力ケーブルの導電材料部分を超伝導線にすることにより従来の $1/100\sim 1/200$ へと断面積を減少させ、低電圧化により電気絶縁材料も薄くすることで、ケーブル断面積を格段に減少できる。このため、直径が 15cm 程度の管路に敷設することができる。また、超伝導ケーブルは同容量の同ケーブルに比べ、重量が約 $1/4$ となり、省資源という意味でも効果が大きい。さらに、中間変電所を削減することで、変換ロスを削減するとともに電力システムの簡素化が図れる。これらより、超伝導ケーブルによる送電は総合的に経済性に優れる。

超伝導ケーブルは常時冷却が必要であるが、電流容量が多く設備利用率の大きなケーブルほど冷却の負担が相対的に小さくなる。このため、将来は各国の動脈的な役割を持つ長距離幹線ケーブルを超伝導化することが考えられる。また、電力大量消費地域である大都市の電力需要増への対応にも超伝導ケーブルが適している。このほか、日本では鉄道の直流電化区間における電線の超伝導化の検討も重要である。

[これまでの取組み]

超伝導に関して、その現象の基本的な機構は理解されているが、臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度の決定因子については未解明な点が多く、超伝導現象の発見以後 100 年を経た今日でさえも、これらの物性を予測して新超伝導体を設計することができていない。高温超伝導の研究は基礎・工学両面とも 1986 年以降の銅酸化物高温超伝導体の発見以降、一気に新しいフェーズに入り、新規高温超伝導体創出、新高温超伝導材料の開発に向けての研究が中心となった。その後の四半世紀の間に日本では、ビスマス系銅酸化物

(1988年)、二ホウ化マグネシウム(2001年)、鉄ニクタイト(2008年)など学術的にも工学的にも世界的に大いに注目される超伝導物質が発見されてきた。銅酸化物高温超伝導材料に関しては、基本特性や超伝導現象の理解などの基礎研究、長尺超伝導線の製造技術の開発、超伝導ケーブルの基本構造の開発などについて、2000年代初頭までに大まかな輪郭が得られた。この銅酸化物高温超伝導材料の開発において日本は世界を今なおリードし続けており、特に線材を中心に材料特性、量産性の改善がこの数年顕著である。

超伝導ケーブルに用いられる長尺高温超伝導線材として、ビスマス系線材(臨界温度:~110 K)が日本の住友電工社で、イットリウム系線材(臨界温度:~90 K)が米国AMSC社、日本のフジクラ社、古河電工社傘下のSuperPower社で製造されており、これらがケーブル製作に用いられてきた。本格的な高温超伝導ケーブルの試験は2001年に日本で始まり、日米欧および中国、韓国でも実施されているが、一部を除いて変電所内や工場内でのプロジェクトであった。2006年には米国、Albany市において初めて実系統に接続する試験が行われた。日本初の実系統連係試験はNEDOプロジェクト「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」として、東京電力、住友電工、前川製作所が参加して、東京電力・旭変電所で2012年10月29日に長さ240 mのケーブルを実系統に接続した系統連係送電が開始され、計画通り2013年12月25日まで1年以上の長期安定運転が検証された。さらに、これまでは交流ケーブル応用であったが、直流ケーブル応用開発がここ数年世界で開始された。2009年度に開始されたJST/S-イノベにおける「鉄道用超電導ケーブルの開発」、平成24年度の補正予算でスタートした「高温超電導直流送電システムの実証研究」(経済産業省)が我が国における代表的なものである。

[今後必要となる取組み]

高温超伝導線の性能向上は継続的に進展しているが、材料自体は現状の5~10倍以上の能力を持っている。さらなる向上には、高温超伝導材料特有の課題である結晶粒界の組成的・微細組織的・電磁的特性の基礎的な理解進展が不可欠である。例えば、ビスマス系超電導線は、Bi、Pb、Sr、Ca、Cu、Oと6元素系で3つの超伝導相、10以上の非超伝導相が出現して複雑な粒界を構成するが、超伝導電流を制限している粒界の特性は十分には分かっていない。

高温超伝導ケーブルは超伝導状態を保つために液体窒素で冷却するが、液体窒素温度領域における冷凍機の効率を高める必要がある。現状の冷凍機は、理想的なカルノー効率に比べて高いもので30%程度(COP: 0.1程度)であり、運転時の経済性向上のため、冷凍機の基礎的な研究を基に40%以上を目指すことが望まれる。

これまでの高温超伝導ケーブル試験を通じて、超伝導ケーブル自体の通電特性は設計値通りの良好なものであることが明らかになっており、超伝導ケーブル間の接続技術もほぼ確立され、大容量化、長尺化に一定の目処が立っている。しかし、冷却技術についてはシステム効率が低いことに加え、長期運転に対する実績や数km以上の長距離ケーブルの冷却の実証が不足しており、断熱技術を含めた冷却技術の向上、信頼性の確保が今後の重要な取り組みとなる。また、事故対応も含めた安全性の検討、実適用箇所の検討などの取り組みが必要である。

(3) 科学技術的・政策的課題

実用的な高温超伝導材料・ケーブルや超伝導送電技術の確立に向けて、材料物性の支配因子を基礎的な超伝導現象にまで遡って理解する努力が必要であり、あらゆる専門領域の研究者を産学から集結させ交流させる場（横断的研究組織）を設けることにより、学術分野間や基礎研究－材料開発技術間の垣根を取り除くことが重要である。別々に育まれてきた技術・知見の融合は双方の研究を加速させ、新規高機能超伝導物質の創製や、高機能超伝導材料・機器の開発につながることを期待される。

鉄道用超伝導ケーブルが注目を浴びているが、応用分野としては従来の電力分野を超えて進展しており、文部科学省、経済産業省にとどまらず国土交通省などの所管領域にも関係してきており、省庁間の連携が重要になる。

(4) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

[新たな技術動向]

直流ケーブル技術の開発が日本、米国、中国、韓国、EU、ロシアなどで進められており、石狩（計 2.5 km）、サンクトペテルブルグ（2.5 km）、鉄道き電線などでの直流超伝導ケーブルのプロジェクト割合が増えてきている。また、米国や日本において、限流機能付き超伝導ケーブルの提案がなされた。

数 kW～20kW 級超伝導ケーブル用の冷凍機の開発が日本やフランスで進められており、液体窒素冷却で高効率を示す冷凍機的设计・開発が進み、近くケーブル試験にて COP=0.1 が実証される予定である。

[注目すべきプロジェクト]

東京電力－住友電工－前川製作所による NEDO プロジェクト「高温超伝導ケーブル実証プロジェクト」において 1 年以上にわたる送電実績が得られたが、冷凍機冷却技術には課題が残った。これに対し、最近決定した後継プロジェクト（2014～2016 年度）では新しいブレイトンタイプの冷凍機を用いるなど、システム全体の長期安定性、信頼性を高める試験が実系統接続の形で実施される。

また、中部大学が実施してきた 200 m 長直流超伝導送電試験実績をベースに、石狩新港地区にて 2000 m+500 m の 2 条の直流超伝導ケーブルを設ける経済産業省プロジェクト（2014～2015 年度）が進行中である。これは民間から提案されたプロジェクトであり、直流の電力を大量に使用するデータセンターへの給電を目的にしている。

一方、長期的視点のもとで実用機器・システムにつながる研究開発とあわせて超伝導応用の学術的・技術的基盤の着実な構築を目指す JST の戦略的イノベーション創出推進プログラム（S-イノベ）「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出」において、鉄道総研が中心となって「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」課題が実施されている。直流区間の鉄道き電線超伝導化では現在 300 m 長まで実証試験が行われたところであり、今後は長距離システムへの展開方法、鉄道電力システムの効率改善やエネルギー面での効果が検討・実証がなされる。

海外では、ドイツのエッセンで運転が始まったばかりの 1 km 交流超伝導送電ケーブル

ルシステムの運転状況・実績には、大都市域低圧交流送電の超伝導化の有効性の観点から注目が集まっている。その他にも、ドイツの AmpaCity プロジェクト、ロシアの St. Petersburg プロジェクト、中国科学院のアルミ精錬直流ケーブルプロジェクト、韓国の済州島プロジェクト、オーストラリアの Queensland プロジェクト、米国のシカゴプロジェクトなどが行われている。

(5) キーワード

- ・超伝導、高温超伝導、臨界温度、臨界磁場、臨界電流密度
- ・超伝導材料、超伝導ケーブル、超電導ケーブル
- ・超伝導技術インターフェース、再生可能エネルギー、蓄電技術、エネルギーインフラ
- ・超伝導送電、直流送電、冷却システム、液体窒素

(6) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	大学や研究独立法人を中心に新規超伝導物質の探索、超伝導現象の理解、高温超伝導線の応用基礎物性の評価など継続して研究が進んでいる。既に工業製品化されたビスマス系超電導線は500MPa以上の高強度化に進展が見られ、超伝導ケーブル以外にもマグネット応用への道が開けつつある。YBCO超伝導線は引き続き国プロでの性能向上が実施されている。ビスマス系線材(1G線材)、イットリウム系線材(2G線材)ともに線材作製、特性評価技術など全般的に高いレベルにあり、多くの産学の研究者がいる。1G線材の住友電工社、2G線材のフジクラ社とともに独自の製造技術を高めることによる性能改善に成功しており、古河電工傘下のSuperPower社では意図的にベンチングセンターを導入した長尺2G線材を開発し販売している。
	応用研究・開発	◎	↗	1G線材はAlbany市や旭変電所でのプロジェクトで実績を挙げたことに加え、エッセン、サンクトペテルブルグ、石狩など1 km以上のプロジェクトでも使用されるなど、着々と実績を蓄えている。また、2G線材を用いた交流ケーブルでは最高の275 kVの高圧応用試験や大容量通電と低損失化に成功するなど、超伝導ケーブル応用の幅を広げる試験に利用されている。また、鉄道用超伝導ケーブル、直流送電システムの実証研究、2014年度から新規にスタートした交流ケーブルの安全性・信頼性実証研究など、実用化へ向けたプロトタイプ開発と実証、実用化へのネックとなる項目を検証するプロジェクトが進んでいる。鉄道用超伝導ケーブルの開発では、試験線で超伝導ケーブルによる給電による電車の走行試験も実施されている。
	産業化	○	→	現状では長大なケーブル応用のニーズに応えられる超伝導線材の生産設備は無く、また冷却方法も十分には確立されていない。超伝導送電技術の導入は基幹インフラに関わるものであり、産業化に至るかどうかは電力会社や国策によるところが大きい。外国向けのケーブル用線材、またはケーブルそのものの出荷形態での産業化のほうが早い可能性がある。なお、データセンターや工場内、港湾施設などインフラと関わらない局所的な直流送電応用も有望であり、石狩プロジェクトが成功すれば同様なプロジェクト提案が続く可能性が高い。ケーブルは超伝導磁石よりも多量の線材を必要とすることから、ニーズに応じて線材の生産設備が拡充されていくことが考えられる。
米国	基礎研究	◎	→	大学を中心に超伝導線の応用基礎物性研究は継続して進められている。国立研究所としては、DOE Energy Frontier Research Centerの一つとしてBrookhaven National Laboratoryに設置されているCenter for Emergent Superconductivityが高温超伝導の基礎研究を今後も4年間継続することが決まった。2010年頃より国からの研究費が大幅に削減されたが、企業、国立研究所にはそれまで15年間の莫大な基礎研究成果の蓄積があり、長尺2G線材の量産化や高機能化がAMSC、SuperPowerの2企業で進められている。
	応用研究・開発	○	→	1990年代後半より超伝導ケーブル試験が始まっており、2006年に世界初の実系統接続試験を行うなど、実績が最も多い。現在もLIPAプロジェクトにおいて実系統600 mの運転が続けられている。Dept. of Homeland Securityが支援する新しいケーブルプロジェクトがAMSCとシカゴのCommonwealth Edisonでスタートした。これは限流機能付きの超伝導ケーブルで複数の変電所を結び電力の安定供給を目指すものでありが。この限流機能付き超伝導ケーブルについては、その実現性に多くの研究者が疑問符を付けており、帰趨が注目される。
	産業化	○	→	日本同様に長大なケーブル応用のニーズに応えられる超伝導線材の生産設備は無く、また冷却方法も十分には確立されていない。ニューメキシコ州にある3大電力網の接点での超伝導ケーブル接続が検討されており、これが着手されれば長尺超伝導ケーブル開発の技術が進展する。YBCO超伝導線はベンチャー2社が引き続き製造・販売中である。

欧州	基礎研究	◎	→	2G線材について線材性能を高めるための基礎研究は大学や国立研究所を中心に根強く続けられており、新規ピンニングセンターの導入方法の開発や、その効果に関する緻密な研究も盛んで、長尺線材開発を視野に入れたプロジェクトEUROTAPESが進行中である。概ね大学を中心としたプロジェクトが進行中であるが、長尺線材開発への展開は日米に遅れをとっている。
	応用研究・開発	◎	↗	欧州のメーカーでは1G線材はほとんど開発の対象になっておらず、また2G線材については長尺線材開発・量産の実績がほとんどない。ケーブル製造はNexans社が実績を挙げている。ドイツのエッセンではAmpaCityプロジェクトとして世界最長の1km超伝導ケーブルの系統連係試験が2014.4.30に2年間の予定でスタートした。またロシアのサンクトペテルブルグで系統連係予定の2.5km直流超伝導ケーブルの製造が2014年に終了予定であり、その後二つの変電所を直流で結ぶ予定である。欧州では、MgB ₂ 超伝導線材の応用が最も活発であり、これまでは超伝導磁石開発が主体であったが、巨大加速器への電力供給用大容量給電線への採用が決まったほか、ヘリウムガスもしくは液体水素冷却下でのケーブルの応用が検討されている。
	産業化	△	↗	ビスマス系超伝導線、YBCO超伝導線ともに工業製品として出荷できるメーカーは未だ育っていない。しかし、欧州初のエッセンの実系統プロジェクトが順調にスタートし、新しい局面を迎えている。また、アフリカで電力生産し欧州へ送電する計画では、直流送電でMgB ₂ 線材を使うことも検討されている。
中国	基礎研究	△	→	大学や国立研究所を中心に高温超伝導線の応用基礎特性に関する研究は継続されている。しかし、新物質探索以外の超伝導に関わる基礎研究は活発でなく、1G、2G線材についても実績に乏しい。産学協同でInnost社が1G線材を開発しているが、特性面で見劣り国内で試用されたのみである。
	応用研究・開発	○	→	長尺1G線材についてはInnost社が開発を行っているが、未だ特性面で住友電工社製品に劣る。また、長尺2G線材の開発実績は無い。ケーブルについては短距離ではあるが工場内や変電所内での運転実績を持ち、中国科学院が実施しているアルミ精錬工場への10kV直流超伝導ケーブルの運転は継続中である。
	産業化	△	→	YBCO超伝導線のベンチャーが上海などに設立されたが、工業製品化には至っていない。中北部の白銀市にこれまでに開発してきた超伝導送電関連の設備を集約しているが稼働実績は不明である。また、西方から東方への送電計画があるが、超伝導技術が採用される可能性は低いと考えられる。国内のケーブル製造技術に乏しく、日欧米の技術に頼らざるを得ないのが現状である。
韓国	基礎研究	△	→	大学や国立研究所を中心に高温超伝導線の応用基礎特性に関する研究は継続されているが、1G線材に関する基礎研究は活発でなく成果もほとんどない。また、2G線材については独自の手法での開発が行われており、高速生産プロセスの確立が産学共同研究で進められている。
	応用研究・開発	○	↗	上記産学共同研究を経て、SuNAM社が長尺線材開発により成功してきたところであるが長尺線材の歩留まりが不十分で、ケーブルは他国製の1Gまたは2G線材を用いLS社が製造している。国プロなどでケーブル試験が続けられており変電所内で500 mケーブルが試験運転されていた(2013年4月終了)。韓国電力が中心に済州島における80kV直流超伝導ケーブル(500m)が敷設され、今年中に試験が開始される予定(半年間)である。これに引き続き、154kV交流ケーブルの試験も予定されている。
	産業化	△	→	YBCO超伝導線のベンチャーが存在するが、工業製品として出荷できるところまでは至っていない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発(プロトタイプの開発含む)のレベル

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註 3) トレンド

↗: 上昇傾向、 →: 現状維持、 ↘: 下降傾向

(7) 参考資料

- 1) JST 戦略的イノベーション創出推進 “超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出” : <http://www.jst.go.jp/s-innova/research/h21theme04.html>
- 2) NEDO イットリウム系超電導電力機器技術開発 : http://www.nedo.go.jp/activities/FK_00018.html
- 3) NEDO 高温超電導ケーブル実証プロジェクト : http://www.nedo.go.jp/activities/FK_00155.html
- 4) 石狩超電導直流送電プロジェクト : <http://www.city.ishikari.hokkaido.jp/content/000038804.pdf>
- 5) NEDO イットリウム系超電導電力機器技術開発 : http://www.nedo.go.jp/activities/FK_00018.html
- 6) 超伝導送電に関する最新のレビュー : 下山淳一、パリテイ 28 (2013) pp.46-50.
- 7) <http://www.rtri.or.jp/press/2013/20130724.html>
- 8) http://www.meti.go.jp/policy/tech_promotion/kenkyuu/saishin/54.pdf
- 9) http://www.nedo.go.jp/koubo/DA2_100062.html
- 10) 2014 Applied Superconductivity Conf. (2014.8.10-15), M. Stemmler et al.: Paper No. 4LOR3B-01
- 11) 2014 Applied Superconductivity Conf. (2014.8.10-15), S. I. Kopylov et al.: Paper No. 4LOR3B-05
- 12) 2014 Applied Superconductivity Conf. (2014.8.10-15), Dong Zhang: Paper No. 4LPo1H-06
- 13) 2014 Applied Superconductivity Conf. (2014.8.10-15), Byeongmo Yang et al.: Paper No. 1LOR2C-05
- 14) 2014 Applied Superconductivity Conf. (2014.8.10-15), Richard Taylor et al.: Paper No. 2LPo2N-04
- 15) <http://www.utilitydive.com/news/coming-to-install-worlds-largest-superconductor-cable-in-chicago/291362/>
- 16) 2014 Applied Superconductivity Conf. (2014.8.10-15), T. Nakashima et al.: Paper No. 1MOR2A-02
- 17) 超電導 Web21, <http://www.istec.or.jp/web21/web21.html>, 2014.3.3, p.3
- 18) <http://www.bnl.gov/energy/ces/news.asp?a=1651&t=pr>

3.3.4 センシングデバイス・システム

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

自然・環境のモニタリング、エネルギー消費の削減、健康管理、利便性が高く安心・安全な生活の維持などを目的に、各種のセンシングデバイス（センサ）とこれらを用いたセンシングシステムの実現を目指す研究開発領域である。センシングデバイスの高感度化、高信頼化、低消費電力化、小型軽量化、低コスト化、およびその電源供給、通信方法、制御方法を含めたシステム設計などの研究開発課題がある。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景と意義]

最近では省エネルギーに対する社会の意識も高まってきており、使用していない電気機器の電源を落とすことや、無駄の少ない製造・生産プロセスを実現するための各種センサの搭載・利用が必要になってきている。また、健康な生活を維持していくためには、体の異常や病気の早期発見が不可欠であり、体の組織や体内物質の日々の検査・モニタリングが望まれ、これが超高齢化に対応する予防医療促進とそれによる医療費削減にも資することが期待される。一方、自然環境を保全し、自然災害から地域や生活を安全に守るためには、CO₂濃度やオゾン層破壊のフロン物質濃度、有害汚染物質濃度、温度、気圧、風力、地震、地殻変動などの各種情報をきめ細かくモニタリングすることが望まれる。人間が入ることが難しいインフラの保全、放射線強度の高い原子力施設や高温の火事現場などでは、その状態を監視できる特殊な観測装置も重要である。

一方、近年では生活における利便性向上、使い易さの向上、安全性の向上などが求められる。スマートフォンのような携帯情報機器や自動車などに多くのセンシングデバイスが搭載されるようになっており、生活の場においてセンサの使用量は爆発的に増大している。例えば、スマートフォンにおいては、3個程度のMEMSマイクロフォン、3軸加速度センサ、3軸ジャイロスコープ、3軸地磁気センサ、圧力センサ、タッチセンサ（タッチパネル）、複数個のイメージセンサ（カメラ）など多数のセンサが搭載されている。2006年に1千万個以下だった世界の年間センサ使用量は2012年には35億個を超え、2020年には1兆個を超えることが見込まれる。このような大量のセンサの普及は、従来IT機器とのみつながっていたインターネットに、実世界の様々なモノを直接つなぐ「モノのインターネット（IoT、Internet of Things）」の発展と相俟って、すべてのものをつなぐIoE(Internet of Everything)として新しい世界を切り開こうとしている。

そのような社会の実現には、これまでのセンサの高感度化、高信頼化、低消費電力化、小型軽量化などに加え、新しい概念のセンサ、センサの応用技術、そして研究開発用の高価なセンサを一般に普及させるための桁違いの低コスト化技術が求められる。また、今後の発展が期待される自動運転自動車、介護・家事ロボット、ドローン（無人飛行体）などの実用化でも、多くのセンサが使われると考えられ、ともに、システムとしての安定性や信頼性が必須であり、これら用途へのセンサへの要求はさらにも厳しいものになる。

[これまでの取組み]

センサネットワークとビッグデータの活用による社会的課題の解決を目指す研究開発

の潮流が本格化しつつあり、環境や人工物のモニタリングなどへの応用が検討されている。

物理現象を利用したセンサ（物理センサ）に関する研究のほとんどは MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いたものである（電気学会主催のセンサー・シンポジウムでの報告）。スマートフォンに用いられているセンサの多くも MEMS 技術によるものであり、また、今後必要になるセンサネットワーク用の多量のセンサにも、低コストで大量生産性に優れる MEMS 技術が重要になることは疑いなく、この分野の研究開発が益々活性化すると思われる。MEMS 技術を応用して小型で無線機能を有するセンサ端末を利用したセンサネットワーク技術の開発が進んできている。

米国では代表的なベンチャー企業である MEMSIC や InvenSense などが、センシングデバイス・システムのビジネスで成功を収めている。欧州では学と公的研究機関とが場所的にも人材的にも近くにあるため、デバイス・システムの組織的な研究開発力が高く、ゼロから実用化開発までを組織的に一気通貫で行える体制になっている。公的研究機関は公的資金だけに頼らず、市場原理によって自立して発展することができており、IMEC（ベルギー）、CEA-LETI Minatec（仏）、Fraunhofer Institute（独）、CSEM（スイス）などがその典型例としてある。センシングデバイス・システム分野でのベンチャー企業やスピンオフ企業（EnOcean など）の活動も、日本より活発である。

化学反応を利用した化学センサとしては、ガスセンサ、pH 等溶液センサ、バイオセンサなどがあり、これらのセンサについては、触媒、吸着剤、官能膜、バイオマテリアルなどの材料技術の研究開発が活発に行われている。

一方、携帯端末に搭載される生体のセンサとしては、小型低コストで使い勝手（消費電力、安定性）の良いものであることを前提として、非侵襲あるいは低侵襲の検出手段を用いる必要がある。光を含む電磁波を用いたセンシングの研究開発も進められている。生体分子間相互作用をセンシングするシリコンフォトニクスを用いた表面プラズモンセンサ、生体物質の検出のための皮膚や衣服に対してある程度透明な赤外光やテラヘルツ波を用いたセンサなどの研究開発が各国で行われている。さらに波長が長いマイクロ波についても、近接場の利用により波長よりも小さな空間分解能で人体を検出する研究や、メタマテリアルを用いてオンチップでのマイクロ波による生体医療解析を目指した研究も行われている。

[今後必要となる取組み]

新しい構造・材料・製造法の採用によってセンサの性能／コスト比を飛躍的に上げることが求められる。性能向上、コスト低減のどちらに重点が置かれるかは応用に依存する。コスト低減は主に企業の改善努力によるものと考えられ、科学技術政策上の優先度は低くなりがちであるが、注意が必要である。例えば、ウプサラ大学とフラウンホーファー研究機構で開発された低コスト MEMS 製造法が欧州で実用化され、スマートフォン用慣性センサの 8 割のシェアを獲得し、日本のメーカーはほぼ撤退に追い込まれたことや、実装を低コスト化できる MEMS マイクロフォンが旧来のエレクトレットコンデンサマイクロフォン（ECM）を駆逐したことなどが挙げられる。

インフラの保全等に利用するセンサでは、使用が非常に長期に渡るため安定性と信頼

性が重要である。このセンサの安定性や信頼性はセンサそのものだけではなく、実装や取付け法によるところが大きいため注意が必要である。このような課題は、具体的な問題の把握が難しく解決策を見つけるまでに長期間を要することもあるが、研究開発の必要性は高い。また、高温や腐食といった過酷な環境で利用されるセンサにたいしては、新たな材料の利用や新たなセンシング方法などのブレークスルーが必要である。

日本においては今後これを用いた高齢化社会の福祉に利用することが有用であると考えられる。健康管理デバイスに関しては先進各国においてそれらの検討は進んでいる。高齢化社会の到来と国民福祉の維持発展を両立するために、センサデバイスを用いた健康管理や日常活動のモニタリングを行うことは、一部で試行が行われているが、大規模な実証試験などは検討段階にとどまっている。健康状態や環境をモニタリングするために各種の化学センサが研究されているが、長期間測定に供する化学センサとしては、既存の触媒燃焼式ガスセンサのように表面の清浄性が保てるもの以外はほとんど実用化されていない。多くの基礎研究例を実用化に繋げるためには、このような問題を避けて通らずに解決する必要がある。使い捨てのセンサや毎回校正できるセンサでは、安定性の問題は回避できるが、普及には低コスト化が課題になる。

(3) 科学技術的・政策的課題

センサの研究開発には、微細加工施設や観察・分析施設が必要になる。これらの整備と維持には大きなコストがかかる上、ノウハウが必要である。我が国では既にいくつかの大学と公的研究機関にそのような施設が整備されており、それらを有効利用して多様な研究開発が実施されることが国全体の投資効率上望ましい。現在、文部科学省が進めているナノテクノロジープラットフォーム事業はまさに上記動機に基づく事業であり、今後、主旨に沿った運営が行われているか点検の上、予算の拡大や設備の充実など事業の充実を図るべきである。また、センサの研究開発拠点を作る必要があり、施設と実績のある機関にその役割を担わせることが期待される。我が国においては、センシングデバイス・システムの出口は大手企業が担うことが多いため、公的研究機関がこれら企業の研究開発リスクを下げ、実用化へのハードルを下げる役割をより一層担う必要がある。さらに、ビジネスの実現や規格の設定においては、これまでのガラパゴス化の轍を踏まないように注意しかつ速やかに動く必要があり、研究開発におけるグローバルな活動を推進する必要がある。

(4) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

[新たな技術動向]

年間に出荷されるセンサの数が現在の 100 倍の 1 兆個になるような社会を 10 年後に実現しようという「Trillion Sensors」という動きが米国を発信地として世界に広がりつつある。米国の産業界が旗振り役となり (代表は Fairchild Semiconductor の Janusz Bryzek 氏)、センサの新規応用発掘、センサの研究開発の促進、政府への働きかけ、産産・産学の連携などがロードマップに沿って進められる。

[注目すべきプロジェクト]

米国 DARPA では、小形ジャイロスコープを画期的に高性能化、あるいは 1 M\$ もするような高性能ジャイロスコープを画期的に小形化・低コスト化するプロジェクト (MRIG Program) が推進され、10 の大学・研究機関が参画している。ジャイロスコープは位置制御 (ナビゲーション) や姿勢制御に用いられるセンサであるが、パーソナルナビゲーション、ロボット、自動運転車、ドローン (小形飛行体) などに必須であるため、デュアルユース技術として研究されている。

NSF の ASSIST (Advanced Self-Powered Systems of Integrated Sensors and Technologies) では、無電源のヘルスマonitoringシステム研究開発が韓国 (KAIST) や日本 (東工大) も参加して行われている。特に、ウェアラブルなセンサとアクチュエータを組み合わせ、センサからの電気信号を感覚代行プロセスで人間の既存の感覚系にマッピングする技術が注目される。神経可塑性のおかげで、超感覚刺激は脳において本来の感覚と同じレベルで知覚できるようになる可能性が示唆されている。

(5) キーワード

- ・センサ、センシング、センシングデバイス、センシングシステム、ジャイロスコープ
- ・MEMS、NEMS、集積回路、強誘電体、磁性体、圧電材料、ナノ材料、極限計測、実装
- ・光材料、ナノフォトニクス、シリコンフォトニクス、近接場、メタマテリアル
- ・状態計測、モニタリング、環境モニタリング、生体内計測
- ・IoT、 Trillion Sensor

(6) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↘	論文数の多さから国際会議での存在感は大きい、日本の企業の貢献は少ない。国内会議でも企業からの発表は低調であり、かつてと比べて研究者の層が薄くなっているとすると心配である。高度な光計測技術、および測定のための近接場光分野において、トップレベルの研究が行われており、1分子検出の基礎研究にも優れている。
	応用研究・開発	○	→	実用化を想定した試作品の開発等を行える施設として、TIAやLC Net が整備されており、大学や公的研究機関の開発環境は向上している。産学連携に力を入れている学側から見ると、講演会等では見えないものの開発は継続的に行われている。
	産業化	○	→	スマートフォンや携帯電話に用いられるセンサの世界市場は大きく、依然として成長しているが、我が国のエレクトロニクスメーカーが回復しておらず、シェアは低い。自動車用途のように高信頼性を要求されるセンサ、自社製品に組み込むセンサ、イメージセンサなどでは実力を維持している。
米国	基礎研究	◎	→	DARPAによる助成等によってダブルユースの研究が活発かつ高水準に行われている。複雑かつ高度な開発を要するジャイロスコープについては基礎研究で抜き進んでいる。磁気センシングによるGPSを超える位置検出への取り組みは注目される。

	応用研究・開発	◎	→	大学等の研究成果がベンチャー企業で実用化される流れが堅調で継続的に成功例が出ている。公的施設（たとえば、NNIN）と民間ファンドリ（たとえば、SVTC (Silicon Valley Technology Center)）が、そのようなベンチャー企業を支えている。
	産業化	◎	→	ベンチャー企業がスマートフォン用ジャイロスコープで約2割のシェアを獲得するなど（日本企業のシェアは1%未満）、アメリカンドリームは顕在である。MEMSマイクロフォンの最大手は米国の企業であり、その事業で成功するまでは小さな補聴器メーカーであった。航空宇宙用等のハイエンド品は米国の独壇場である。
欧州	基礎研究	◎	→	欧州では応用研究志向が強く、基礎研究と応用研究とは一体である。一見地味な研究が多いため、国際会議での採択数は米国に及ばないが、本質を捉えた基礎研究はそれがわかっていない者にはしばしば地味に見えるため注意が必要である。
	応用研究・開発	◎	→	MEMSセンサの覇者であるボッシュやSTMicroelectronicsでは、公的研究機関も巻き込んで活発な研究開発が行われている。大学より公的研究機関の貢献が大きい。マイクロ波センシングに独自のアプローチがある。
	産業化	◎	↗	MEMSセンサのシェアの多くがボッシュやSTMicroelectronicsのような欧州企業に握られている。市場は継続的に年率20%近く成長している。
中国	基礎研究	○	↗	数年前まで中国からの研究発表に目立つものは少なかったが、最近では優れた研究成果が報告されている。センサ応用に関する学生コンテスト (iCAN) には10000人も学生が参加するそう（日本では50人程度）、若者の関心が高いことがうかがわれ、今後も研究活動は活発化するとと思われる。
	応用研究・開発	△	↗	センサやMEMSの研究開発の歴史が浅いことがあり、研究開発は初めから応用志向である。まだ中国発の新しいセンサは顕在化していない。
	産業化	△	↗	MEMSマイクロフォンの急速な普及を受けて、その工場が中国で稼働している。これを足掛かりに中国発のセンサが産業化される可能性はある。
韓国	基礎研究	○	→	センサに関する大学等の研究開発に積極的な政府投資が行われているとは聞いていない。国際会議での存在感では台湾に追い抜かれたと思われる。
	応用研究・開発	△	→	サムソングループ等でも研究開発を行っているが、技術的蓄積に乏しく、必ずしも順調に開発が進んでいるとは言えない。海外のベンチャー企業の買収やそこへの出資で技術を取り込もうとはしている。
	産業化	△	→	サムソンやLGでは、現状、センサ類は海外から調達している。巨大企業の内でも部品事業は行いにくいと推測される。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向

(7) 参考資料

- 1) TSensors Summit Abstracts for trillion sensor roadmap, October 23-25, 2013,
<http://www.tsensorssummit.org/Resources/TSensors%20Summit%20Abstracts.pdf>
- 2) シスコシステムズ合同会社 IoT インキュベーションラボ:「Internet of Everything の衝撃」、インプレス R&D、2013年12月6日

- 3) <http://genalyte.com/>
- 4) http://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ja&user=IoPkLrYAAAAJ&cstart=140&citation_for_view=IoPkLrYAAAAJ:Z5m8FVwuT1cC
- 5) Margarita Puentes Vargas: Planar Metamaterial Based Microwave Sensor Arrays for Biomedical Analysis and Treatment, Springer, 2014.
- 6) S. Guan et al., Wireless Powered Implantable Biosensor tag System-on-chip for 2011 IEEE Continuous Glucose Monitoring, Biomedical Circuits and Systems Conference.
- 7) Arati Prabhakar: Statement, May 14, 2014
<http://www.appropriations.senate.gov/sites/default/files/hearings/Dr%20Prabhakar%20Statement.pdf>.
- 8) Patric Tucker: Four DARPA Projects That Could Be Bigger Than The Internet
<http://www.defenseone.com/technology/2014/05/four-darpa-projects-could-be-bigger-in-internet/84856/>
- 9) [http://www.darpa.mil/Our Work/DSO/Programs/Quantum-Assisted Sensing and Readout \(QuASAR\).aspx](http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Quantum-Assisted_Sensing_and_Readout_(QuASAR).aspx)
- 10) <http://assist.ncsu.edu/>
- 11) http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503353
- 12) http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=13362
- 13) http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=501025

3.3.5 放射性物質の除染・減容化など基盤的技術

(1) 研究開発領域の簡潔な説明

福島第一原発事故後 3 年半が過ぎた 2014 年現在、汚染地域の除染・減容化を一層進めるには、除染作業に伴って発生する膨大な汚染物質を保管する仮置き場の安全性の確保、中間貯蔵施設の放射性物質の安全な処理・処分・管理が求められている。さらに、原発敷地内での汚染水処理対策と除染に伴う廃棄物の安全な処理・処分・減容化も必要である。

これらに対応するためには、放射性物質の検出方法、各種汚染物質、特に放射性 Cs の各種環境媒体中での挙動の検証等のナノテク・材料科学に基づいた基礎的研究とともに、それらを組み合わせた除染・減容化技術に関する研究開発が必須とされる。

(2) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

[背景と意義]

福島第一原発事故により環境中に広範囲に放出された放射性物質による環境の汚染が生じており、人の健康や生活環境に及ぼす影響を速やかに低減するには、汚染地域の除染を早急に行うことが喫緊の課題となっている。その放射線量と半減期の観点から Cs-137 (半減期: 約 30 年)、Cs-134 (半減期: 約 2 年) が主な除染対象放射性物質である。そのために放射性 Cs の吸着材の最適化が材料科学分野では進められてきた。

農地土壌、グラウンド等の除染に際しては、表土の剥ぎ取りといった既存技術で対応しているが、剥ぎ取った汚染土の仮置き場所の確保とともにそこに保管されている汚染物の安定性が問題となっている。

また、海水を含む多量の汚染水の処理・処分も大きな問題となっている。福島第一原発敷地内および原子炉建屋内では、燃料溶融に伴って放射性核分裂生成物 (FP: fission products) が冷却水中に放出された。事故後汚染水中の放射性 Cs は、米国キュリオン社のゼオライト吸着塔、フランスアレバ社の化合物によるセシウム吸着塔、さらに東芝製 SARRY (第二セシウム吸着塔) の稼働により、Cs-137 等の FP の放射能は減少した。その後、放射性 Cs の他に放射性 Sr、Ni、Co など 62 種類の放射性核種の除去装置「ALPS (Advanced Liquid Processing System)」も設置され、トラブルはあるもののこれらの汚染水処理システムは機能している。汚染水問題の根本的な対策は、格納容器の封水、地下水等からの流れ込みにもよる汚染水送料の低減と封じ込め、効果的な浄化システムである。上記除染システムでは、62 種の放射性核種の除去は可能であるが、トリチウムは除去できない。さらに汚染水浄化に使った放射性 Cs を吸着したゼオライト吸着塔や汚泥が敷地内に大量に一時保管されているが、それらの根本的な処理方法はいまだ未確立である。



仮置き場

仮置き場

[これまでの取組み]

内閣府平成 23 年度科学技術戦略推進費「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」により、農林水産省農林水産技術会議を中心に、関係各府省・研究機関などが参画し、農地土壌除染研究が実施された。物理的・化学的・生物学的除染技術を用いた農業再生を目指して進められた。

内閣府による「除染モデル実証事業」において、日本原子力研究開発機構 (JAEA) 福島環境安全センターは、「農地・森林・宅地・道路等の除染、除染に伴う廃棄物の仮置き場・仮置き場での処理・処分を検討した。その際には除染技術の効率化、コストの低減、廃棄物の減容・再利用が重要となる。特に減容に際しては、廃棄物の安定性の確保、3R (reuse, recycle, reduce) の観点および今後設置される中間貯蔵施設での貯蔵・処理・処分等の考慮が必須である。そのためには、放射線量の変化の推定・移動抑制の有効な技術、さらには減容化の重要な技術の一つである焼却処理の際のセシウムの挙動の解明研究が必要となる。

環境省は、「中間貯蔵施設安全対策検討会及び環境安全保全対策検討会」において、除染廃棄物の貯蔵・処分の指針を検討した。この指針では、除染廃棄物はまず仮置き場に保管されるか事前に焼却される。さらに仮置き場に保管された廃棄物は必要に応じて減容化 (基本的には可燃物の焼却) される。処理により生じた焼却灰は放射線線量に応じて保管される。一方で、除染や汚染廃棄物の処理の加速化・除染作業効率化等のために「除染技術実証事業」を JAEA の協力 (技術選定・評価業務等の受託) で取り組んでいる。今後活用できる除染、廃棄物処理、さらには中間貯蔵の技術等の実証試験の実施と共に、その効果・安全性・経済性が検討される。汚染土壌の減容化に関しては、分級・熱処理・化学処理等が検討された。ため池等の対策としては、水中分級・底土除去・拡散防止が検討された。廃棄物処理については、洗浄・炭化・焼却法とそれに伴う焼却灰の安全性の確保が検討された。本実証事業は、平成 23 年度から継続して行われ、平成 26 年度においても「土壌等除染除去物の減容化」、「汚染廃棄物の処理」、「除去物の運搬や一時保管、中間貯蔵等関連」の有効な技術開発が進められている。

平成 24 年度から開始された JAEA 運営費交付金事業「セシウム脱離機構解明と脱離法の開発」は、JAEA を中心として大学・独立行政法人研究機関・財団法人からなるオールジャパンの体制で取り組み中である。今後の除染・減容化に対しての科学的根拠を明確にしつつあり、安全・安心な処理・処分への貢献が大いに期待される (詳細は (4) 注

目動向を参照)。

日本学術会議東日本復興支援委員会放射能対策分科会による第二次提言において、府省横断的・領域横断的な調査・研究体制の構築の必要性が指摘された。この提言に対する一つの試みとして、「福島第一原子力発電所事故由来放射性物質調査研究 分野横断ワークショップ」が2014年3月に開催された。放射性物質の環境中での動態や影響の評価、廃棄物処理や除染といった対応策などに関する調査研究は、大学や国立研究機関など数多くの機関・関連する学術分野・関連する学会などにおいて個別に進められてきたが、このワークショップを契機に、

- ・大規模な研究プロジェクトの実施
- ・複数の機関による新たな研究体制の構築
- ・関係省庁における対応策の検討への参画などを通じた専門家のネットワークの構築
- ・機関や学会の壁にとらわれない情報の共有と整理を集中的実施

が行われ、今後の中長期的な確かな対応につなげるために、個別に進められてきた調査研究を俯瞰する簡潔なレポートが作成され、社会に広く公開された。

海外に関しては、米国スリーマイル島の原発事故(1979年3月)、チェルノブイリ原発事故(1986年4月)への対応に基づく基礎研究はある。しかし、事故に伴う除染の経験は皆無に近く、農地や住居地を積極的に除染・復興するための技術開発もなされていない。特に今回の事故では放射性セシウムが日本の土壤中に多く含まれている粘土鉱物に固定されていることがこれまでの海外の経験と大きく異なっている。海外研究機関においては、福島問題へのアプローチが進み、各種国際会議(たとえば、ゴールドシュミット会議(米国地球化学会と欧州地球化学連合が主催する地球化学分野での国際会議)、国際鉱物学連合会議(IMA)、国際粘土研究連合(ICC)、アジア粘土会議(Asian Clay)、欧州粘土会議(Euroclay)など)で活発に議論・討論されている。JAEAも積極的に海外機関・研究者との意見交換・情報交換を進めており、2013年よりCs-workshopと称して、放射性Csと粘土鉱物の相互作用・空間分布・モニタリング等に関して貴重な議論を行う機会を作り出している。

[今後必要となる取組み]

福島県内で除染により生じる除去土壌は、2千万 m³を超える膨大な量となっている。その他にも大量の放射能汚染廃棄物も存在する。これらをいかに仮置き場・中間貯蔵施設で処理・管理し、さらには最終的に県外での処分に際して、いかに減容化するかが重要な課題となる。従って、除染や減容化・長期安定化のために必要な材料・技術の研究開発は、重要な課題である。研究開発では、放射性Csと土壌・粘土・粘土鉱物との相互作用、さらには放射性Csの粘土鉱物中での安定性を踏まえた対応が必要となる。

減容化技術としては、熱処理(焼却・熔融・焼成など)、機械的処理(分別・選別・分級など)がある。減容化技術は、中間処理施設への搬入量の低減する事前減容化と、中間処理施設から最終処分場への移転量を低減する減容化に適用されることを考慮する必要がある。特に不燃系廃棄物(汚染土壌など)の減容化は、中間貯蔵施設の負荷量低減等の観点から極めて重要であり、一層の減容化率向上、コスト低減が必要である。減容化処理後の濃縮物の貯蔵期間、維持管理も考慮しなければならない。さらに、浄化土の

有効利用・再利用の観点も重要であり、浄化土の管理された有効再利用（たとえば中間貯蔵施設造成の資材など）も考慮に入れるべきである。

基礎研究による粘土鉱物 - 放射性 Cs 相互作用に関する研究成果（(4) 注目動向参照）は、放射性 Cs の土壌中での安定性や土壌分別・分級法などの減容化処理において必須と考えられる。汚染土壌に対しては、分級洗浄の前処理として、選別・分別が必須となる。焼却処理に関しては、焼却灰への対応が重用となる。焼却灰の内、主灰に対してはスラグ・焼成物としての取り扱いで、セラミックス・セメント分野等からの貢献が大いに期待される。

飛灰については、従来のセメント固化に加えて、効率的な減容化に際しての濃縮・回収、新たな吸着材の開発が必要となる。さらに、減容・中間処理施設への負担軽減の観点から、処理後の浄化土壌の限定的再利用・リサイクルを考える必要がある。小規模・分散利用は避け長期間の履歴管理可能な公共工事への適用等が考えられる。これらの除染・減容化技術を現場で活用可能なものにするため、分野横断・府省横断的対応をさらに推し進めることが必須と考える。

福島第一原発敷地内では、今も汚染水が発生し、SARRY や KURION などのセシウム除去システムや ALPS による多核種除去システムにより、放射性 Cs・Sr 等の放射性核分裂生成物の除去対策が進められているが、水と同じような挙動をするトリチウムはこれらのシステムでは除去できない。トリチウムの分離法は、技術的には比較的よく検討されており、安全性・安心性の確保と共に、設備・コスト・処理期間を考慮した適切な処分方法の選択（再利用・金属貯蔵・固化埋設・大気放出・海洋放出等）が、科学的裏付けを踏まえ中長期的に開発することが期待される。

(3) 科学技術的・政策的課題

原発事故・放射線対策に対する政府の対応体制の中、除染、廃棄物対策、モニタリング及び放射性物質汚染に関する安心・安全の確保（環境リスクに係るリスクコミュニケーションを含む）は環境省が総括責任を負い、科学技術面は文部科学省が日本原子力研究開発機構を中心に全面的に支援する体制となっている。農林水産業の再生、農地などの除染は、農林水産省が分担しており、研究開発の成果を現地で実証し、拡大している。これらの対応には、関係府省の緊密な連携と共に、地元自治体の協力も継続して必要となってくる。

除染・減容化に関しては、除去土壌、汚染廃棄物の性状や放射能レベルを考慮し、いかに中間処理施設において安全に保管・処理・処分するかが最も重要な課題となる。これまでの政策的対応は、安全対策の基に推進されてきたが、今後は、社会的要素（ゼロリスクの偏重、被害者意識）と技術合理的対応（低環境負荷、適正コスト）とのバランスを考慮しながら現実的で合理性のある政策への転換が必要と考えられる。

技術合理的対応をより有効に進めるには、化学・物理、無機材料、資源等の研究分野に加えて、地球科学、建設・農業土木、土壌肥料等の研究分野も含んだ分野横断型・産官学横断型・府省横断型の体制の構築、関連機関の連携による「オールジャパンと国際連携による取り組み」が今後さらに必要である。

(4) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

[新たな技術動向]

- SPring8 放射光施設の広域 X 線吸収微細構造法 (EXAFS) や X 線光電子分光分析を用いて、粘土鉱物バーミキュライトに収着した Cs の原子レベルでの局所構造や化学状態を評価した。その結果、バーミキュライト中の Cs に特異な共有結合を見出し、その収着の強さを裏付けた (JAEA)。
- 第一原理分子動力学法による粘土鉱物への Cs 収着挙動の解析を進め、放射性 Cs の特異な吸着位置、いわゆるフライドエッジサイトへの収着、溶液環境の違いによる Cs 収着強度の違いを明らかにした (JAEA・NIMS)。
- イメージングプレートを使用して、ラジオオートグラフィによる放射能を有する微粒子の特定と、高分解能電子顕微鏡による鉱物分析法との組合せた手法の開発とその適用により、放射能を有する微粒子として風化の度合いが進んだ黒雲母が最有力候補である報告されている (東大・JAEA)。
- 実汚染土壌からの放射性 Cs の脱離挙動特性に関して溶液化学的検討を進め、汚染土壌からの放射性セシウムの脱離挙動を検討した。放射性 Cs がバーミキュライトや雲母粘土鉱物等の層電荷の高い粘土鉱物に収着し、その強さは雲母粘土鉱物中の K と同等であることから、固定されている放射性 Cs の大半は、一般的な環境下では長期に安定であると推察した (電力中央研究所)。
- Cs 可視化検出法として、ポータブルガンマカメラ (東芝) や超広角コンプトンカメラとガンマプロッター (JAEA) が報告されているが、共に高価で空間分解能に難点があった。蛍光強度や電気化学的特性の違いを利用する蛍光プローブ (カチオンセンサー: Cesium Green) を開発し、紫外線を照射により固体表面に分布する Cs の可視化に成功している (NIMS)。
- 汚染土壌の減容化の方法として、高温処理による放射性 Cs の揮発除去がある。しかし、1300 °Cでの熱処理では、土壌が熔融ガラス化するために、Cs の拡散が阻止され、処理物中に残留することが報告されている。この問題に対して、CaO/SiO₂比の調整・塩素源の添加により熔融ガラス化を阻害し、Cs の揮発率を大幅に向上させる処理法の可能性が示された。特に安定 Cs を吸着させたベントナイトでは、揮発率 99%であった。さらに実汚染土壌 (数万 Bq/kg の放射性 Cs を含む) の処理では、クリアランスレベル (100 Bq/kg) 以下まで低減できることが報告されている。今後は、セメント産業で用いられている回転式昇華装置 (ロータリーキルン炉など) による減容化技術の検討とともに、スラグ焼成物の再利用・今後の知見の収集に向けた更なる検討が期待されている。
- 除染で生じた廃棄物の内、可燃性のもの、特に植物に関しては現在焼却による減容化が想定されている。焼却灰では、主灰中の放射性 Cs の溶出性は低く、飛灰中の放射性 Cs は溶出性が高いことが知られている。飛灰より水で抽出可能な放射性 Cs をプルシアンブルーを用いた吸着剤で濃縮回収し減容化する技術が検討されている。これら焼却灰の性状による汚染物の処理フローのさらなる検討が進められている。
- 汚染土壌中の Cs 吸着特性に注目した高度湿式分級による汚染土壌の減容化が検討されている。湿式土壌分級洗浄法は、土木・地盤工学分野において広く用いられる重

金属土壌汚染対策技術である。土壌中で汚染物質を選択的に多く含む細粒分を物理的に分離し、汚染土壌の減容化を行う技術である。汚染土壌中の放射性 Cs を細粒分に集め、土壌分級洗浄により汚染土壌を減容できる可能性が示された。ただし、土壌の種類により分級の効率は異なることから、さらに検討が必要である。

- ・福島県の一産業である森林業では間伐等の森林作業は必須である。間伐作業にともなう作業道路の設置等により土砂流出が促進される。土砂流出時に放射性 Cs を固定している粘土鉱物粒子だけを捕獲できれば、有効な除染対策となる。さらに、除染した平地の再汚染を防止する対策にもなる。除染には、現在進められている薬剤・電力・人力等を使い日常的メンテナンスを必要とするアクティブな除染と、これらができる限り必要としないメンテナンスフリーに近いパッシブな除染がある。里山・森林の除染に対しては、流水泥水中の放射性 Cs を固定した懸濁粘土鉱物粒子を捕獲する吸着材を設置するだけのパッシブな除染が望ましいと考えられる。このような用途への最適な吸着材としてメソポアを有するジオマテリアル・珪藻土に注目し、その除染現場への適用・汚染土壌の減容化への検討が進められ、天然メソポア材料・珪藻土の有効性が示された。

[注目すべきプロジェクト]

日本原子力研究開発機構 (JAEA) 運営費交付金事業「セシウム脱離機構解明と脱離法の開発」: 日本原子力研究開発機構を中心に、オールジャパンの体制 (参画機関: 物質・材料研究機構、国際農林水産業研究センター、産業技術総合研究所、電力技術中央研究所、北海道大学、東北大学、金沢大学、金沢工業大学、東京大学、首都大学東京、岡山大学、宮崎大学) で取り組み中である。SPring8 放射光施設の広域 X 線吸収微細構造法 (EXAFS) や X 線光電子分光分析、第一原理分子動力学法による解析、ラジオオートグラフィと高分解能電子顕微鏡法との組合せた手法、高度湿式分級法、高度湿式分級法、実汚染土壌からの放射性 Cs の脱離挙動特性の解明等は、本プロジェクトの成果である。これらの新しい知見により除染・減容化を一気に高度化できる可能性が大きい。放射性 Cs の土壌・粘土・粘土鉱物などとの結合・離脱メカニズム解明により、除染・減容化技術に対して科学的裏付けのある安全性の高い効率のよい手法が指針として示されることが期待される。

(5) キーワード

放射性 Cs、汚染物の除染・減容化、放射性廃棄物の長期安定化、土壌、粘土鉱物、分別・分級、焼却、吸着材料

(6) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↑	最先端的基礎研究による粘土鉱物 - 放射性Cs相互作用に関するにより、粘土鉱物中での放射性Csの安定性・不溶性が解明されつつある。JAEAを中心にオールジャパン体制での注目成果であり、その応用・除染実施研究への大きな展開が期待される。
	応用研究・開発	△	↑	基礎研究の成果を踏まえた除染・減容化への対応が進められている。環境省が除染・廃棄物対策・モニタリング・リスクマネージメントに対して総括責任を取り、文部科学省のJAEA・NIMA等が科学技術面を支援する体制がある。農業再生については、農水省が中心となり対応が進んでいる。
	産業化	△/○	↑	環境省が、除染技術実証事業をJAEAの技術選定・評価への協力で進めている。除染実施・減容化実施、さらには仮置き場・中間貯蔵施設での処理。処分、安全性の確保への検討が進みつつある。
米国	基礎研究	△	↓	スリーマイル島の原発事故対応での記録有り。
	応用研究・開発	△	↓	同上。
	産業化	○	↓	福島現地での汚染水の除染にキュリオン社の水浄化システムが利用された。
欧州	基礎研究	△	↓	チェルノブイリの原発事故対応での記録有り。基本的に封鎖・隔離での対応が中心であったため、生物学的な手法による農作物への放射性物質の移行防止などの受動的な対応策が中心であった。
	応用研究・開発	△	↓	同上。
	産業化	○	↓	福島現地での汚染水の除染にアレバ社の水浄化システムが当初利用された。
中国	基礎研究	×	→	—
	応用研究・開発	×	→	—
	産業化	×	→	—
韓国	基礎研究	×	→	—
	応用研究・開発	×	→	—
	産業化	×	→	—

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑ : 上昇傾向、 → : 現状維持、 ↓ : 下降傾向