解説

核融合研究で開発された最先端技術の波及効果

日本原子力研究開発機構 栗原 研一，東京大学 小川 雄一

核融合実現に向けた課題克服を目的に研究開発された多数の最先端技術は、これまで他の産業分野へも活発に応用されてきた。現在、国際熱核融合実験炉 ITER 建設や原型炉を目指した幅広いアプローチ活動が技術課題と格闘しながら展開される中、本稿では、核融合研究で開発された最先端技術が、どのような機器に技術波及したか、あるいは可能性があるかについて現状を俯瞰し、科学技術創造立国の一翼を担っているとも言える核融合研究開発の新たな魅力を紹介する。

I. はじめに—核融合技術の波及効果の調査史

我が国の第2段階核融合研究開発基本計画(1975年原子力委員会策定)における中核装置「臨界プラズマ試験装置 JT-60」は、装置ミッションである臨界プラズマ条件を1996年に達成し、トカマク型核融合装置が、持続的原子核反応を高効率に起こす手法として成立することを実証した。これは、第3段階核融合研究開発基本計画(1992年同委員会策定、現行計画)の中核装置である実験炉 ITER の建設開始へとつながり、早期の実験開始に参加極の全精力が投入されている。また並行して核融合発電炉実現への最終ステップである原型炉に向け、プラズマ制御面及び装置工学面の最終課題解決の方策を検討してゆく活動が進められているところである。

JT-60の建設からそのミッション達成までの20年以上にわたる装置開発活動に加え、ITER の工学設計活動、また慣性核融合実験装置激光IX号レーザーの開発における高パワーレーザー技術や大型ヘリカル装置 LHD の開発における超伝導コイル技術などでは、我が国の産業界の電気、電子、機械、真空技術などと広範囲且つ密接な相互発展を樹立し、その結果多くの技術創出の実績も評価されている。

それら新しい技術は、当初は核融合における課題解決を目的に開発された訳であるが、それが核融合という超や極という語から始まる最先端の科学分野であることにより、応用についても全く新しい領域が切り拓かれることが多い。そこで他の分野の未解決課題の克服に貢献する場合や全く新規の応用が見出される場合もあり、総じて波及効果と呼ばれている。本来の目標達成までの道程

が長く、長期間の研究開発投資を要する最先端科学技術分野の推進には、社会への早期還元は不可欠と言える。

核融合研究開発をこの波及効果という観点で捉える試みは1986年に、当時の日本原子力研究所から原子力産業会議(現原子力産業協会の前身)に調査が委託され、具体的事例を系統的に報告書にまとめられた¹⁾。また、1998年には、核融合エネルギーの社会的受容性を論ずる中で、1970年代からの JT-60建設以降の波及効果について、総合的網羅的にまとめて報告された²⁾。欧米でも核融合開発の波及効果調査報告が1980年代に行われ、産業界の国際競争力強化に対する意義などに言及していることなど、文献2の冒頭で詳しくレビューされている。

その後、実験炉 ITER の建設サイトが決定された2006年に、それまでの JT-60実験や ITER 工学設計活動結果を踏まえて、核融合工学技術に絞っての波及効果について日本原子力研究開発機構で定点観測的なレビューが内部の検討として行われた。第1図にその際の分類の概念を示す。工学技術領域は、我が国の原型炉概念として想定されているトカマク型核融合装置にとって主要な要素技術、超伝導、NBI加熱、RF加熱、中性子工学、ブランケット工学、トリチウム、遠隔保守、真空工学等を取り上げた。波及分野については、(a)ナノテクノロジー・材料、(b)ライフサイエンス、(c)情報通信、(d)環境、(e)エネルギー・一般産業分野、の5分野とした。

2006年以降、ITER の建設活動への移行や幅広いアプローチ(BA)計画が始動するなど、新規に実機的设计製作が開始され、それに先立って試作開発が並行して実施されてきたが、その中でも波及の可能性のある技術が開発されている。そこで今回、最新の技術情報を収集し、それを基に解説を行う。なお、本稿では磁場閉じ込め装置開発での波及効果技術を中心に取り上げる。

A Survey of Spin-offs from State-of-the-art Technology Created in Fusion Research and Development: Kenichi KURIHARA, Yuichi OGAWA.

(2013年 2月4日 受理)

第1図 核融合工学技術の波及効果(代表的波及分野)

第1表 核融合工学技術からの波及効果の具体例一覧表

波及分野	項 目
ナノテクノロジー・材料	① 超伝導高磁場発生による高品位シリコン単結晶の引き上げ ② イオンビームを用いたナノ加工技術 (ハードディスク製造への応用) ③ RFプラズマ・プロセッシング技術による新材料の創成 ④ RF技術によるセラミックス焼結 ⑤ 真空技術 (真空熱天秤、高分解能質量分析器等) の波及効果
ライフサイエンス	① 超伝導技術による医療用MRI、高分解能NMRスペクトロメーター、粒子線治療用加速器 ② 水素同位体分離技術を用いた医療用レーザー精製技術 ③ 遠隔保守用複合 (レーザー照射と観察) ファイバーの医療応用 ④ 大電流連続加速技術のホウ素中性子捕獲療法 (癌治療) への応用
情報通信	① イオンビームによる次世代半導体基板の製作 ② イオンビームを用いた大型液晶画面の製作 ③ 指向性の良いミリ波帯高周波を用いた宇宙レーダー等への応用 ④ 核融合燃料精製技術を用いた半導体製造におけるガス精製技術
環境	① 超伝導技術による磁気分離システム (下水浄化装置等への応用) ② 大電流電子ビームによる有害物質の分解 ③ 大電力RFによる誘雷、デブリレーダー ④ RF技術による有毒物質の分解 ⑤ 核融合燃料精製技術を用いた可搬型リアルタイム環境モニタリング装置 ⑥ ベレットによる宇宙空間デブリ・隕石の衝突シミュレーター ⑦ 高温等圧加圧接合技術も大型精密構造物製作への適用
エネルギー・一般産業分野	① 超伝導技術による電力貯蔵 (SMES) ② 超伝導コイル用低温構造物材料の水素エネルギー・システムへの応用 ③ RF技術のエネルギー伝送、加速器等への応用 ④ 核融合燃料分析技術を用いた化学工業プロセス・モニタリング装置 ⑤ 免震技術及び免震要素のリアルタイム・モニタリング技術 ⑥ 極限環境下での高精度光学式ペリスコープ ⑦ 配管内走行自動溶接・切断・検査ロボット ⑧ 高放射線環境下での高精度距離測定センサー ⑨ T字継ぎ手低歪溶接法の応用 ⑩ CVD単結晶ダイヤモンド検出器の応用 ⑪ 高エネルギー中性子による大型機器の非破壊検査 ⑫ 構造設計法の高度化による薄くて強い構造物の実現 ⑬ 高性能炭素複合材料の応用 ⑭ 高性能冷却管の応用 ⑮ 水素回収技術の水素製造プラント保全技術への応用 ⑯ 海水中からのリチウム資源回収技術 ⑰ プロトン導電体を用いた水素製造、燃料電池への応用 ⑱ 高出力ファイバーレーザーを用いた高品質加工技術 ⑲ 高耐熱性フレキシブル放射線 (中性子・ガンマ線) 遮蔽樹脂 ⑳ JT-60技術の波及 (エネルギー貯蔵、直流送電、大電力四極管等)

Ⅱ．波及効果を生む技術

波及分野として選定した5分野に貢献する可能性のある技術を、核融合工学の各技術要素から核融合研究者側から見て抽出した具体例40項目を、第1表に示す。この抽出では、波及効果を利用する側である産業界から見ても、実応用に貢献し得るものがある一方、まだ種の段階に留まるものもあり、その意味では応用レベルが様々であることを付記しておく。

1. 超伝導技術

大型の超伝導技術は、核融合研究開発の要求に応える形で発展して来たと言っても過言ではない。磁場核融合装置は、ジュール発熱する銅導体コイルの利用ではエネルギー発生装置に成り得ないからである。1990年代のITER工学試作開発において、高磁界(13T以上)を発生できるニオブ・スズ(Nb₃Sn)超伝導線材の開発と量産化に成功し実機製作への見通しが得られ、現在、他の技術課題もクリアしITER用超伝導コイル実機製作が開始されている。この一連の超伝導コイル試作開発で培われた技術は、製造メーカーの超伝導関連機器製造技術に波及し、それらは医療用MRIや粒子線治療用加速器応用へとつながった。

超強磁場の創出が可能であるニオブ・スズ超伝導線を用いた超大型の超伝導コイルは、第2図に示すように、超伝導電力貯蔵システム(SMES)への試作開発が進められ、エネルギー貯蔵容量の大幅な拡大が研究機関や産業界により検討されている。

超伝導技術の波及を考えるとときのキーワードは、強磁場、極低温、低温高強度、冷凍機、高蓄積エネルギー、高温超伝導等であるので、その点で波及分野での課題解決につながるかどうかを考える。第3図に現在までの超伝導技術の到達レベルを示す。この図は同時に波及効果を検討するヒントを提供する。

2. 中性粒子入射(NBI)加熱技術

臨界プラズマに必要な1億度以上の温度にするためには、追加熱が不可欠である。最も確実な加熱が中性粒子ビーム入射である。粒子ビーム入射装置は一種の加速器であり、ビームエネルギーは高々数百keVから1MeV程度であるが、そのビーム電流は数10A以上の大電流であり、入射パワー

でMWのビームという特徴を持つ。その達成には、世界初の挑戦のため幾多の技術的困難を克服しながら実現された。その後、プラズマに注入運動量を向上させる加速電圧の増加が要請され、中性化効率が正イオンでは限界があるため、負イオン加速中性粒子ビーム入射装置の開発に移行した。2008年に停止したJT-60の運転最終期では400 keVの高エネルギー粒子の入射を実現し、ITER用には1 MeVで40 Aのビームを開発している。

第2図 SMES用超伝導要素コイル
(5 kW×1 h 相当のエネルギー蓄積)

第3図 超伝導技術の達成レベル

核融合開発によって大きく進展したイオン源に関する技術を用いて製品化されたイオンビーム加工機は、ハードディスクの微細加工などに利用されている。また、最新の負イオン NBI ビームを用いて次世代半導体基板の製作という波及効果の実用化が有望視されている。第4図に示すように、単結晶シリコンウェハーに水素負イオンビームを照射注入し、水素原子層を作り、剥離させてシリコンの薄板を製造するというものである。第5図には、負イオンビーム技術の達成レベルを示す。

3. 高周波(RF)加熱

これまで3つの異なる周波数帯の高周波加熱装置が開発された。すなわち、イオンサイクロトロン周波数(100 MHz)帯、低域混成波(2 GHz)帯、電子サイクロトロン

第4図 負イオン粒子ビームを用いた次世代半導体基板の製作

第5図 負イオンビームの達成レベル

(EC)周波数(100 GHz)帯。特に、EC加熱入射を用いた局所的な電流駆動により、プラズマの性能を劣化させプラズマ崩壊を引き起こす不安定性の抑制に成功し、運転シナリオに組み入れられている。このため ITER, 原型炉以降でも使われることが想定される100 GHz以上のEC周波数用ミリ波発振器ジャイロトロン開発が精力的に実施され、第6図に示すように、ITERの目標である周波数、パワー、持続時間、効率を既に同時に達成している。

波及効果として、セラミックス焼結用のジャイロトロン(周波数28 GHz)が挙げられる。飛躍的に高いマイクロ波吸収率を実現し、セラミック焼結の消費電力を大幅に減らした。高速加熱、局所加熱、セラミック接合が可能であり、精密小型部品から厚肉・複雑形状部品まで対応できるという特徴を持つ。各種機能材料、圧電セラミック、積層デバイス材料、自動車用構造材料(エンジン、スプリング)等の製造研究が進展している。

4. トリチウム取扱い技術

燃料となる大量トリチウムを取り扱う技術は、第7図に示すように、燃料サイクルを構成する要素技術からなり、これまでの研究開発で核融合炉の要求技術はほぼクリアしている。トリチウムガスが建家内に漏れた場合でも、雰囲気ガスを浄化してトリチウムだけを回収するシステムやブランケットで生成されたトリチウムをヘリウムなどのスイープガスで取り出し、その後、トリチウムだけを選択回収するシステムなどの試作実証が進んでいる。

トリチウム取扱い技術の一つの波及効果として、ガス分析技術を用いた可搬型リアルタイム環境モニタリング装置がある。マイクロガスクロマトグラフのカラム及び検出器部分をマイクロチップ化し、有機成分(メタン等)、空気成分、水素同位体の高速分析(2分以内=従来の1/20以下に時間短縮、ガス漏洩なし)し、装置の小型軽量化(重量・容積を1/5以下)を達成した。自動車排気

第6図 ジャイロトロンの達成レベル

第7図 核融合炉トリチウム取扱い技術

ガス、ダイオキシン等の分析やモニタへの応用も見込まれる。

5. 真空工学技術

核融合の真空は、超清浄・超高真空という特徴から、そこで開発された技術の波及効果として、既に製品化され利用されているものが多い。例えば、微量発生ガスの迅速且つ高感度の計測が可能なガス質量分析装置の利用では、自動車用アルミ合金といった鑄造製品からの放出ガス分析による品質管理や、野菜からの放出ガス分析による鮮度の指標策定等に用いられている。

応用製品としては、以下の(a), (b), (c)が既存。(d)は開発中。(a)真空熱天秤：2千万分の1の精度で重量測定を実現(従来10万分の1)(第8図左参照)。(b)ヘリカル溝型真空ポンプ：出口軽水素圧力1,000 Pa域で連続運転を実現(従来圧力10 Pa域)、完全オイルフリー。(c)高分解能質量分析計：重水素(D₂)とヘリウム(He)を10 ppmの精度で分別測定を実現(従来精度1,000 ppm)(第8図右参照)。(d)高純度分離装置：従来技術では不可能であった室温、大気圧条件下での連続分離を実現(200 Pa・m³/s)

6. 中性子工学技術

核融合炉では、超伝導コイルにおける核発熱防止や計測器保護のために、中性子・ガンマ線遮蔽が必要となるが、一方、狭隘部に遮蔽用金属を挿入することは極めて困難な場合が多い。そこで、フレキシブルで耐熱性(250℃)を有する遮蔽樹脂材として、ゲル状樹脂材料から自由に成型できる遮蔽材の製作方法が開発されている。

代表的な中性子遮蔽樹脂材であるポリエチレンと同程度のCf中性子遮蔽性能を持ち、中性子吸収物質より密度の高い重金属粉末を均一分散で混練する製作方法によりガンマ線遮蔽材にも使用可能というものである。第9図に製品を示す。

第8図 真空技術の波及効果としての製品化例
(左：真空熱天秤(新光電子株)，右：高分解能質量分析計(株)アルバック))

第9図 高耐熱性フレキシブル中性子遮蔽樹脂材(左)とガンマ線遮蔽樹脂材(右)

この技術は本来の機能を、中性子やガンマ線を取り扱う核分裂炉など核融合炉とは別の放射線発生装置での応用を想定した波及効果である。

7. ブランケット工学技術

核融合炉において、ブランケットは工学的に最も複雑で課題も多く残る構成要素と言える。その課題の多くは未踏技術であることから、課題解決の結果として、同時に波及効果をもたらすことも期待できる。その一つとして、他の産業へのインパクトが大きいと考えられる波及効果を紹介する。

核融合炉の燃料増殖ブランケットにおいて、トリチウム生産の原料はリチウムの同位体⁶Liであるが、陸上の資源としては、大容量電池等への需要が多く、大量に輸入で賄うことは極めて難しい。一方、天然のリチウム元素は海水中に大量に含まれており、⁶Liは約7.6%存在していることから海水からのリチウム資源の回収技術が求められる。リチウムは、パソコンのバッテリーやハイブリッド車の車載電池等多方面への利用もあるレアメタルであり、海水からの大量回収は、我が国の資源の安全保障に貢献することにもなる。

第10図に示すように、イオン液体を海水側と回収側の液層の間に介在させることによりLiイオンが回収側に移行するという原理を用いた技術開発が最近急速に進んでいる。既に海水中Liの最大22%の回収に成功している。

第10図 海水中リチウムを回収するイオン液体応用技術の原理

第11図 複合型光ファイバの概念

8. 遠隔保守技術

放射化した核融合炉近傍には、人が近づくことは不可能であることから、高機能の遠隔保守機器は必須である。代表的なものは、大型重量物であるブランケット着脱ロボット、配管の遠隔溶断・溶接ロボット等である。

その波及効果は、本来機能の単純な他分野への適用だけでも有効なものも多いが、ここでは、ライフサイエンスへの波及の可能性がある複合ファイバを紹介する。これは冷却配管の溶断・溶接用 YAG レーザーを伝送させる機能とその状況を観察するイメージガイド機能との2つの機能を合わせ持つファイバである。

第11図にそのファイバの断面図を示す。高出力 YAG レーザーと高解像度との両立性が特徴となり、波及としては医療用レーザーメスなどが想定される。

9. その他の技術の波及効果

第1表に示しただけでも期待される核融合技術の波及効果が多数存在するが、現在 BA 活動として実施している国際核融合材料照射施設 (IFMIF) の工学実証活動からのガン治療への波及効果に触れる。最先端のガン治療法として注目されているホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) は、中性子を照射することでガン細胞だけを選択的に破壊する。これまで原子炉の中性子を使って行われてきた

が、加速器による制御性改善などを目指していながら、大電流加速器技術とターゲット技術に課題を抱えていた。一方、IFMIF はこれまで世界に例のない大電流のイオンビームを発生できる加速器とそれを受ける液体金属リチウム流の開発を行っており、125 mA という大電流加速器と 20 m/s の高速の液体リチウム流のループにより、これまで不可能だった大量の中性子の発生、大規模な最先端ガン治療施設という大きな波及効果が期待される。

Ⅲ. 結びとして

人類未踏の技術に挑戦している核融合研究開発を進めることによるメリットの一つとして波及効果を概観した。波及効果は、核融合先端技術の強力推進により、国際社会におけるわが国の技術基盤を強くし、同時に多額の投資に対する社会への早期還元を行うことにもなり、まさに科学技術創造立国の牽引車としての役割を果たしている。また産業界においては、その国際競争力を高め、国力の源である貿易収支をプラス側に誘導することが期待される。さらに波及効果を通じて、大学、産業界、研究機関は、技術面での相互発展が過去に展開された良好な実績も有している。今後、核融合発電炉までの開発ステップにおける社会からの理解と支援を得るためにも、所期の目的である人類恒久のエネルギー源探求のみならず、技術的副産物である様々な波及効果を通して広く社会貢献している事実を発信することが肝要であろう。

— 参考資料 —

- 1) 核融合波及効果調査委員会, “核融合研究開発の波及効果に関する調査報告”, 日本原子力産業会議, (1987).
- 2) 森野信幸, 小川雄一, “核融合エネルギーの社会的受容性と科学的見通しⅡ: 10. 波及効果”, プラズマ核融合学

著者紹介

栗原研一(くりはら・けんいち)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)核融合プラズマの挙動解明に関わる実践的研究開発, 課題解決に有効な新しい方法論/見方/考え方

小川雄一(おがわ・ゆういち)

東京大学
(専門分野/関心分野)核融合プラズマ研究・核融合炉設計, および核融合エネルギー開発戦略