

ITER計画の推進について

平成13年5月29日
文部科学省研究開発局
核融合開発室

1. 国民理解の醸成

核融合エネルギーの実現は、何十年もの歳月を要するプロジェクトであり、国民の十分な理解を得られなければその推進は困難であり、安全性を含めた正確な情報の提供を十分に行うなど、不断の努力が必要である。

特に、廃棄物の処理処分を含む安全性に関する情報については、国民に対し、わかりやすい情報の提供が必要である。

そのため、シンポジウムや勉強会などが各地で開催される際には、要請に応じて職員が説明に伺うなど、情報の提供を行っているところであり、今後とも積極的に提供を行い、理解と協力が得られるよう努めることが必要。

(別添1：トリチウム等に関する資料)

(別添2：廃棄物に関する資料)

(別添3：ITER施設の安全確保の基本的な考え方について)

2. ITER設置に関する観点

(1) 国際的役割

21世紀の我が国は、世界に誇れるような研究のインフラとなる施設を持ち、世界の研究者にそれを公開して我が国の存在意義を高めるとともに、相互依存の関係を維持していくべき。

(2) 科学技術的潜在力

我が国の核融合に関する研究開発力は、その人的な研究開発能力や産業力から国際社会でも高く評価されており、我が国は十分な科学技術的潜在力を有している。我が国が世界で唯一のITERを主導的に建設することにより、この分野の科学技術力及び産業技術において我が国の科学技術潜在力を長期間維持できる可能性がある。

○ノウハウ等経験の蓄積が得られる

- ・ 工学分野に関しては、ITERの建設現場での研究が不可欠のことが多い。
- ・ 資金分担により実験機会、実験スペース、研究者の参加割合が割り当てられるため、ホスト国がノウハウ等経験の蓄積を多く得られる。
- ・ 本体建設費の内、建家・機器組立等はホスト国負担（ホスト国実施）が想定されているため、システムの統合技術はホスト国に蓄積される。
- ・ 我が国の研究者・技術者が、容易に、数多く参加しやすい。

(3) 日本社会の倫理性からの評価

核融合エネルギー開発は、現世代の人々に直接的な利益をもたらすのではないが、未来の人類を思う公共的意識を社会的に顕出させるものとなりうる。また、これまでの我が国の原子力平和利用の実績は国際的に高く評価されており、我が国が核融合エネルギー開発を主導することを諸外国から受容される条件が整っている。

(4) 投資面からの評価

核融合エネルギーの研究開発は、広義の安全保障及び国際協力の観点から、国として実施すべきものとしてプライオリティが高く、人類の未来への投資と見なすべき。

研究開発が、より広く基礎科学に寄与する、あるいは、広範な産業分野の技術進展に寄与するという波及効果や、国際協力を通じて得られる経験が重要。

世代間を通じる協力は、人類社会にかけがえのない信頼感を生む。

○波及効果

- ・ I T E R 計画懇談会等に報告された「核融合エネルギーの技術的実現性計画の拡がりと裾野としての基礎研究に関する報告書」(別添4)において、I T E R の科学的・技術的波及効果について検討され、①身近な技術への波及、②先端技術としての他分野への影響、③基礎的な学問への貢献・活性化、のそれぞれに大きな影響が期待できるとされている。
- ・ なお、原子力学会での論文(別添5)、米国エネルギー省科学局核融合エネルギー研究諮問委員会報告書(別添6)、日本原子力研究所報告書(別添7)においても、核融合研究開発による波及効果がまとめられている。

○ホスト国のみの経済効果

- ・ 本体建設費の約1/4及びサイト整備費、運転費は、ホスト国にのみに経済効果を与える。
- ・ ホスト国に設置されるI T E R 実施組織国際チーム(本部)の建設期間の構成は、研究者200人程度、支援者200人程度と想定されるが、これら職員及び家族がホスト国に居住する。

(5) その他

- ・ ホスト国の安全規制体系が、核融合の安全規制のデファクト・スタンダードとして大きな影響を与える。
- ・ I T E R のホスト国は、原型炉に対する支援装置(I T E R)保有国として、原型炉時代においても研究開発をリードする科学的、技術的基礎を保有する。

(6) 留意点

- ・ 今後行われる公式政府間協議等における各極等の動向は、大型国際共同プロジェクトを推進する上で重要であるだけでなく、国民の理解を得る上でも極めて重要であり、公式政府間協議への参加等により情報収集に努めることが、我

が国へ誘致の是非について最終的に政府として判断するために必要。

- ・ 我が国にサイトとなり得るところがあるかどうかを見極めるための、サイト選定の実施は、我が国への誘致の是非について最終的に政府として判断するために必要。
- ・ ITERコストのシミュレーションとして、我が国の分担総額は、国内に設置する場合は、海外に設置する場合よりも大きくなる。(少なくとも2倍)
- ・ 技術やノウハウ等経験は外国企業が落札した場合は蓄積されない。
- ・ ホスト国となった場合、ホスト国がプロジェクトを主導できるが、一方では調整のためにホスト国の有利性を抑制することを求められる可能性がある。
- ・ 安全対策や地元対応などの研究以外の面の対応が必要。
- ・ 海外の研究者及び家族に対する配慮を考えることが必要。

(参考1) 海外に設置して日本が利用する方法

○ITERが海外に設置された場合、建設、運転期間中に、研究者、支援者をITER実施組織に派遣すること等で、日本が利用することができる。

- ・ 但し、実験機会、実験スペース、研究者の参加割合が、資金分担率により割り当てられる。
- ・ プラズマ物理実験に関しては、海外で実験することで成果が得られ、また、ホスト国の安全規制法令が許す範囲において、海外からの遠隔実験も実施可能。

(参考2) アメリカの状況

○米国エネルギー省は参加継続を意図していたが、1997年米国議会の支持が得られなかった。その理由は、当時のITERの本体建設費が1兆円と大きく、また、建設サイトが未定であった等ITERの実現性に危惧があったため。(下院科学委員会が、これ以上の支出は意味がない、大型装置を造るよりも今は小型の装置で基礎的な研究をすべきと判断したとの新聞報道もあり。)

○米国は国内に豊富なエネルギー資源を有しており、エネルギー資源に乏しい我が国とは異なる状況がある。また、米国エネルギー省予算削減の議論があり、核融合エネルギー予算が前年比で約2/3とされ、これを受けて、核融合エネルギー科学プログラムへの再構築が検討され、核融合戦略がエネルギー開発指向から科学指向へと変更されたことが影響している。

○なお、核兵器備蓄管理プログラムの一環として、慣性核融合研究を行っている。

○本年5月17日に発表された、米国の新エネルギー政策において、

- ・ 水素エネルギーと核融合は、エネルギー源として実用化するまでに顕著な進展が必要であるが、最近10年余に渡り技術的な進歩が得られており、さらなる進展によって遠い将来のエネルギー源を近い将来のものにできると期待される、としている。

○米国の超党派議員(Zoe Lofgren(民主党、カリフォルニア州)他19名)は、

- ・ 長期的エネルギー源としての核融合の科学的探求と開発のため、磁気核融合燃焼プラズマ実験の計画を立案するようエネルギー省長官に要求する、件に関する動議を、本年5月9日に下院科学委員会に上程した。

トリチウムとは？

トリチウムは水素の仲間、水素とほぼ同じ性質を持ち、水素のあるところには必ず存在する。トリチウムは放射能を持ち、半減期は12.3年で、弱いβ線を放出してヘリウムに変わる。このβ線は、空気中で5mm、水中では0.006mm透過する。

宇宙線と大気との反応で年間200g程度のトリチウムが天然に作られている。

トリチウムは体内に入った場合、普通の水素と同様に体内の水分代謝とともに、汗や尿として排出される。半分が排出されるまでの時間は約10日。上述のようにトリチウムのβ線は最大でも18keVと弱く、厚紙一枚でとまるので、外部被曝よりはむしろ内部被曝が検討される。

ITERでのトリチウム安全取り扱い

ITERでは、燃料として放射性物質であるトリチウムを取り扱う。施設内のトリチウム保有量は約3kg（約 10^{18} ベクレル）と評価されており、そのうち、最大約1.2kgが真空容器内に、また残りは燃料処理貯蔵施設に分散して存在する。このことから、ITER施設では、「公衆及び放射線作業従事者にこれらによる放射線障害を及ぼす恐れが無いように措置を講ずる」ことを安全確保の目標としている。

その目標を達成するため、平常時にあっては合理的に達成可能な限り低く保つよう放射線障害の防止に努め、事故発生を防止する措置を講じる。具体的には、公衆の年効線量当量が国の法的限度を十分に下回るように維持するための措置を講じる。

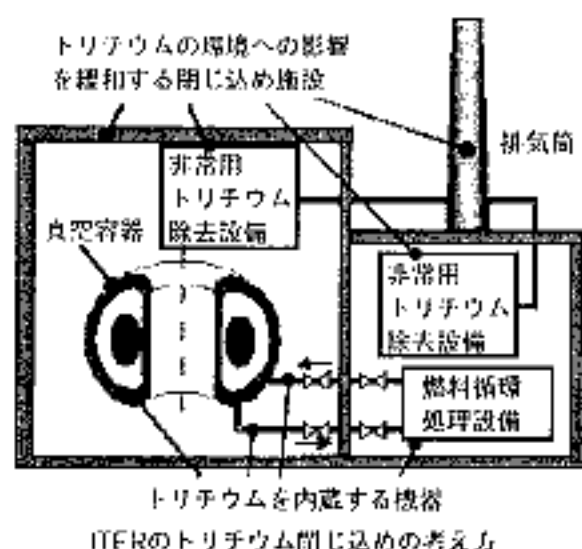
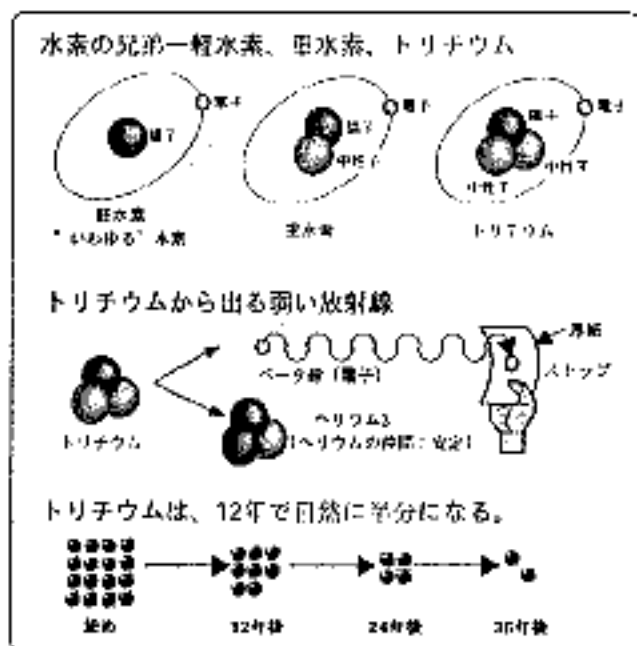
事故発生を防止するために、トリチウムを内蔵する機器の気密、十分な構造強度を確保・維持し、及び必要に応じて圧力逃がし機構を設置する。また、万一に備え、放出放射性物質をできる限り除去・低減するコンファインメント施設（閉じ込め施設）を設け、トリチウムの環境への異常な放出を防止する。

設計上想定する事故事象

上述のように、十分に事故発生防止に努めるが、ITERの安全設計の解析評価のために、以下の7つの事故事象が想定されている。

1) トリチウム燃料系に係る事象、2) 真空容器システムの閉じ込め障壁の破損、3) 真空容器外冷却水系に係る事象、4) 真空容器内機器に係る事象、5) プラズマに係る事象、6) 超伝導コイルに係る事象、7) 商用電源喪失。

この内、最初の3事象では、トリチウムを内蔵する機器からトリチウムのトカマク区画（建家内）への放出が想定されている。予備的な評価では、「ITER施設の安全確保の考え方（科学技術庁H12.7）」に基づき、非常用トリチウム除去設備を設置し（上図参照）トリチウムを除去するので、環境に放出されるトリチウムはごく僅かと評価されている。また、残る4つの事象は、固有の安全性、受動的安全性、及び設備設計によって、放射性物質の建家への放出なく事象は終息すると評価されている。



ITERの廃棄物

ITERは20年間の運転の結果、トリチウムが機器に付着すること、真空容器内部の機器等が中性子の照射により放射化することにより、廃炉・解体時に放射性廃棄物が発生する。

放射性廃棄物中に含まれる代表的な放射性核種は、C-14、Co-60、Ni-63、Nb-94である。

ITERで発生する放射性廃棄物は、すべて低レベル放射性廃棄物と呼ばれるものであり、その量は運転停止直後の量では約3万9千トンと見積もられている。原子力発電所（電気出力100万kW）の廃炉・解体時の放射性廃棄物は高レベル放射性廃棄物が約200 m³、低レベル放射性廃棄物が約8000～10000トンであり、ITERの低レベル放射性廃棄物は、原子力発電所の4-5倍となる。

ITERで発生する放射性廃棄物の性質は、 α 核種（ウラン、プルトニウム等、 α 線を放出する放射性元素）がない。 β γ 核種（C-14、Co-60等電子及び電磁波を放出する放射性元素）の濃度は、原子力発電所の低レベル放射性廃棄物の200分の1（高レベル放射性廃棄物と比較すると約1万分の1）と、はるかに小さい。

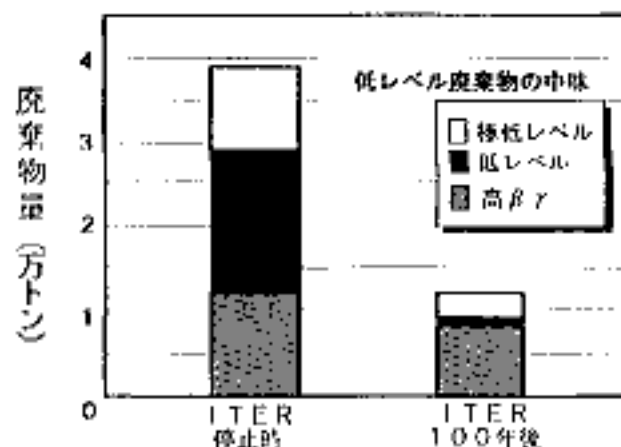
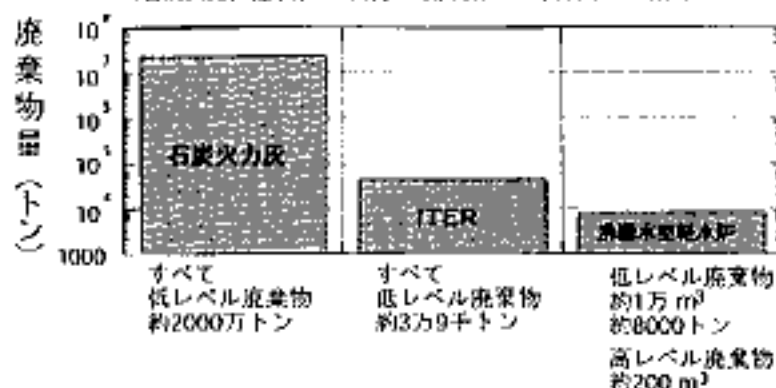
放射性廃棄物の分類とその処理

●以下の廃棄物については、処分の考え方*が既に示されている。

- (1)高 β γ 濃度区分低レベル放射性廃棄物：「地下利用に十分余裕を持った深度に処分」（例えば地表から50-100 m程度の深度）
- (2)低濃度区分低レベル放射性廃棄物：浅地中の「コンクリートピット処分」
- (3)極低濃度区分低レベル放射性廃棄物：「素堀り処分」

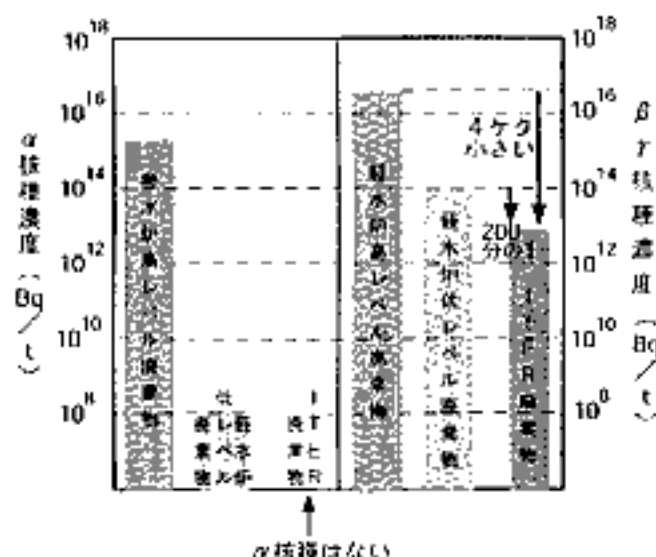
*「RI・研究所等廃棄物処理処分の基本的考え方について」
原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会（平成10年5月）

●ITER廃棄物量の経時変化

●廃炉時の石炭火力、ITER及び核分裂炉の廃棄物量比較
(石炭火力、軽水炉：100万kW発電所が30年稼働した場合)

出典：原子力委員会核燃料循環開発戦略検討委員会
「核融合エネルギーの技術的実現性 計画の進め方と視野としての基礎研究に関する報告書」(平成17年5月)121

●廃棄物中の放射性物質の濃度比較



I T E R施設の 安全確保の基本的な考え方について

平成 1 2 年 7 月

1. はじめに

科学技術庁では、国際熱核融合実験炉（ITER）の安全規制に関して、ITER の基本的特性を踏まえた安全確保の考え方及び当面設計に反映すべき事項の策定を目的として原子炉安全技術顧問の会合を開催した。

同顧問の会合では、ITER の概要設計報告書に基づいて、ITER 施設に特有な安全上の特徴、安全上の要件、事故の評価等について検討し、ITER 施設の安全を確保する上での基本的な考え方について議論され、本報告書はその結果について取りまとめたものである。

本報告書では、検討の対象とした ITER 施設の概要及び安全確保の目標、安全確保の原則、安全設計の基本的な方針、免震構造により耐震安全性の確保を図る考え方を示した。これらは、いずれも ITER 施設に特有な放射線安全に関する検討に基づくものであり、労働安全衛生法、消防法等の放射線安全以外の事項については、別途既存の法令、基準等で対応を図ることとする。

また、ITER 施設は、プラズマを閉じ込めるため強力な磁場を発生することから、磁場の影響についても、電磁場の安全性に係る国際的な勧告等を踏まえ、適切に対応することとする。

なお、本顧問会で議論がなされたもののうち今後の対応が必要とされた項目を「今後の課題」として整理し、報告書中に取りまとめた。

2. ITER 施設の概要

2.1 ITER 施設の目的と主たる構成機器

ITER 施設は、平和利用を目的とした核融合エネルギーの科学的・技術的実現性を実証する試験装置であり、重水素とトリチウムのプラズマによる高出力長時間燃焼（最終的には定常運転）の実現を目指すとともに、ブランケット及びダイバータ等の炉工学試験を実施することとしている。

このため、約 500MW の核融合出力を約 400 秒間持続する運転を標準（運転モードを参考として別図－1 に示す）として、種々の性能試験を計画している。

炉工学試験では、最初にしゃへい用のブランケットを装着し、その後トリチウムの増殖を行うブランケットに変更する段階的な試験を計画している。

上記の目的及びトリチウム等の放射性物質に対する安全性を考慮した ITER 施設は、トカマク施設、トカマク付帯施設、燃料処理貯蔵施設、放射性気体、固体及び液体の廃棄物処理施設、冷却系統施設、計測制御系統施設、放射線管理施設、電気系統施設、建物・構築物等で構成する。これらのうち、安全確保の考え方を検討する上で主要な施設は、以下の通りである。

(1) トカマク施設（プラズマの形成・維持）

- ① 真空容器：トーラス形状の容器で、プラズマの形成・維持のため高真空の維持等を行い、内部にトリチウム及び放射化生成物等を内蔵する。
- ② ブランケット及びダイバータ：真空容器の内部に配置されるモジュール式の機器であり、しゃへい及び不純物の制御等の機能を有する試験機器として交換を計画している。
- ③ 超伝導コイル：真空容器の周囲に配置され、プラズマの閉じ込め磁場を形成するトロイダル磁場（TF）コイル、プラズマ電流の立ち上げ・維持を行う中心ソレノイド（CS）コイル、及びプラズマの位置・形状を制御するポロイダル磁場（PF）コイルがある。
- ④ トーラス真空排気系：真空容器のポートに取り付けられる真空排気ポンプで、不純物ガス及び未燃焼の燃料ガス（重水素、トリチウム）を排気し、プラズマの純度を維持する。
- ⑤ 燃料注入設備：真空容器のポートを介してプラズマに燃料ガスを供給する。
- ⑥ 追加熱設備：真空容器のポートを介してプラズマの加熱及びプラズマ電流の駆動を行う。

(2) 燃料処理貯蔵施設（水素同位体の精製・回収、分離・貯蔵及び分配）

- ① 精製回収系：トーラス真空排気系の排気ガスから水素同位体ガスを精製・回収する。
- ② 水素同位体分離系：精製・回収した水素同位体ガスから燃料ガスを濃縮・分離する。
- ③ 燃料貯蔵分配系：燃料ガスを貯蔵し、燃料注入設備に分配する。

(3) 放射性気体廃棄物処理施設（建家内の雰囲気中の放射性物質の除去・低減）

- ① 通常換気系：平常時の建家内雰囲気温度の調整及び給排気による空気流を調整することで清浄区域への汚染の拡がりを防止する。
- ② 通常雰囲気浄化系：主に保守時にグローブボックス等の内部の漏洩トリチウム等を循環運転により除去・低減する。処理した雰囲気の一部を排出ガス処理系に送ることによりグローブボックス内を負圧に維持し、グローブボックス外側の部屋等への汚染の拡がりを防止する。
- ③ 非常用雰囲気浄化系：事故時に区画等に放出される放射性物質を循環運転により除去・低減する。処理した雰囲気の一部を排出ガス処理系に送ることにより区画内を負圧に維持する。
- ④ 排出ガス処理系：平常時においては通常雰囲気浄化系からの排出ガスを受け入れ、また、事故時においては非常用雰囲気浄化系からの排出ガスを受け入れ、これらの排出ガス中の放射性物質を除去・低減し、区画等の負圧を維持する。

(4) 建物・構築物

- ① トカマク建家：トカマク施設、燃料処理貯蔵施設等を収納する建家で、事故時に放出される放射性物質を隔離するトカマクピット区画、トリチウム区画等を備える。
- ② 排気筒：区画等の内部の雰囲気を排出する。

2.2 安全上の特徴

(1) 内蔵する放射性物質とその影響

通常運転時の ITER 施設における可動性放射性物質としては、トリチウム及び放射化ダストが主たるものである。ITER 概要設計報告書によれば、施設内のトリチウム保有量は約 2.8 kg (約 10^{10} Bq) と評価され、そのうち、約 1.2 kg が真空容器内 (主に、ブランケット、ダイバータ等の機器に吸着) に、また残りは燃料処理貯蔵施設の各機器に分散して存在する (施設内のトリチウム保有量を参考として別図-2 に示すが、これらの値は、今後の設計の進捗により増減されることが想定される)。

また、放射化ダストについては、プラズマに対向する壁面での浸食作用により生成するが、これまでの実験結果等を踏まえ、管理上、タングステンダストが 100 kg、ベリリウムダストが 100 kg、炭素繊維複合材のダストが 200 kg を上限として存在するとしている。これらのうち、タングステンダストは、体外被ばくのソースタームとして、約 10^{10} MeV・Bq (タングステンダスト 100 kg 中の核種の実効エネルギーと放射能の積の合計) と評価される。

100m 高さの排気筒からの全量放出を仮定して、これらの可動性放射性物質がもたらす内部及び外部被ばくによる実効線量当量を評価すると、内部被ばく主体のトリチウム 1.2kg (4×10^{10} Bq) は数十 mSv に、被ばく形態が内部及び外部被ばくとなるタングステンダスト 100kg は例えば事故後 1 週間までのグランドシャインによる線量当量も考慮した場合にトリチウムと同レベルの線量となる (これ以外のダストの影響は、タングステンダストに比べて十分に小さい)。

これより、ITER 施設は、放射性物質を内蔵する機器等から放射性物質が異常に放出される事故時の公衆の放射線被ばくを十分に低く抑えるために、放出放射性物質を除去・低減する施設 (影響緩和施設) を備える必要がある。

(2) 影響緩和施設 (コンファインメント施設)

コンファインメント施設は、以下の機能を有する非常用雰囲気浄化系、コンファインメント区画、排気ガス処理系、排気筒等で構成され、想定する事故時に公衆の放射線被ばくを十分低く抑え、事故の影響緩和を図るものとしている。

- ① 非常用雰囲気浄化系: 放射性物質を内蔵する機器等からコンファインメント区画内に放出された放射性物質を除去・低減する。
- ② コンファインメント区画: 放出放射性物質による汚染を限定された領域内に留めるために、建家内に設定する区画である。
- ③ 排気ガス処理系: コンファインメント区画内に放出された放射性物質を除去・低減するとともに、通常の建家の漏洩率を考慮し、コンファインメント区画の内部雰囲気を負圧に維持し、放射性物質の放出経路を排気筒に限定する。
- ④ 排気筒: コンファインメント区画内の雰囲気を排出する。

(3) 放射性物質を内蔵する機器等に作用するエネルギーと考慮すべき荷重

ITER 施設において、放射性物質を内蔵する機器等のうち、真空容器、燃料処理貯蔵施設、並びにブランケット及びダイバーター次冷却系には、核融合反応等に伴う熱及び磁気エネルギー、並びに冷却水及び液体水素同位体の内部エネルギー等が作用する。これらの機器に作用するエネルギー及び考慮すべき荷重は、表 1 のように整理される。

表 1 放射性物質を内蔵する機器に作用するエネルギーと考慮すべき荷重

放射性物質を内蔵する 主要な機器等	作用するエネルギー	考慮すべき荷重
真空容器	・核融合出力 (約 500MW) ・プラズマが保有する熱エネルギー (約 400MJ) ・プラズマに入射するエネルギー (約 50MW)	核融合出力の増大 (熱源異常) による熱負荷 通常熱除去機能の喪失による熱負荷及び電磁力
	放射化に伴う崩壊熱 (最大 0.5MW/m ³)	通常熱除去機能の喪失による崩壊熱による熱負荷
	冷却水の内部エネルギー	真空容器内での試験機器損傷に伴う冷却水放出等による過圧
	プラズマの保有する磁気エネルギー (約 300MJ)	ディスラプションによる熱負荷及び電磁力
	超伝導コイル系中の磁気エネルギー (約 50GJ)	超伝導コイルの短絡等による超伝導コイルの変形
燃料処理貯蔵施設	液体水素同位体の内部エネルギー	冷凍機能の低下による過圧
ブランケット及びダイバーター次冷却系	冷却水の内部エネルギー	冷却系の圧力制御の故障等による過圧

(4) ITER 施設の安全上の特徴

ITER 施設の安全上の特徴は、表 2 に要約される。これらの特徴を踏まえれば、放射性物質を内蔵する機器等の健全性を確保するために、表 1 に示した考慮すべき荷重のうち過圧荷重による機器破損の発生を防止する対策を講じることが必要となる (別図-3 に、圧力逃がし機構を備えた場合の代表的な事象のシーケンスを示す)。

表 2 ITER 施設の安全上の特徴

核融合反応に備わる固有の特徴	・核的暴走がない ・プラズマの圧力限界、密度限界による反応終息性 ・不純物等の混入に対する反応終息性
ITER 装置条件下で固有の特徴	・崩壊熱密度が小さい
ITER の本来機能確保により得られる特徴	・真空容器等の気密性が高い ・電磁力に対する真空容器の構造強度の確保 ・電磁力に対する超伝導コイルの構造強度の確保
安全機能を確保するために設計対応を要する特徴	・放射性物質を内蔵する特定の機器が過圧される可能性がある

3. 安全確保の基本的な考え方

第2章の ITER 施設の概要に基づき、安全確保のための基本的な考え方を以下に定める。

なお、今回検討対象とした範囲が ITER 概要設計報告書であること、また、ITER 施設が核融合の研究・開発のための試験装置であることに鑑み、今後、研究開発の進捗及び技術的な改良により設計が本報告書の内容と合致しなくなっても、この考え方により本報告書の内容と同等又は同等以上の安全性が確保されると判断される場合には、この考え方を適用してさしつかえない。

3.1 安全確保の目標

ITER 施設は、トリチウム等の放射性物質を取り扱うことから、「公衆及び放射線業務従事者（以下、従事者）にこれらによる放射線障害を及ぼすおそれがないように措置を講ずる（施設を設計、製作し、維持）」ことを安全確保の目標とする。

3.2 安全確保の原則

安全確保の目標を満足するよう、平常時にあっては ALARA の精神に則り放射線障害の防止に努めること。また、事故の発生を防止する措置を講じるとともに、深層防護の原則に従い事故の発生を仮定し、その影響を緩和できる措置を講じること。

この措置を講じるにあたっては、固有の反応終息性やハザードポテンシャル等の ITER 施設の安全上の特徴を考慮し、以下の考え方によること。

- ① 平常時において、環境中への放出放射性物質及び施設から直接放出される放射線による公衆の実効線量当量が、国の定める法的限度を超えないように施策することはもとより、ALARA の精神に従い、これらに起因する公衆の実効線量当量を合理的に達成できる限り低減すること。

また、従事者の実効線量当量については、国際放射線防護委員会（ICRP）の勧告に従い、年間 20mSv を超えないよう施策すること。

- ② 事故の発生を防止するため、放射性物質を内蔵する機器等については、十分な構造強度を確保、維持するとともに、必要に応じて圧力逃がし機構を設けること。

また、放射性物質の異常な放出を伴うような事故時においても、公衆に過度の放射線被ばくを及ぼすおそれがないよう、コンファインメント施設を設けて放出放射性物質の環境への異常な放出を防止すること。

3.3 安全設計の基本的な方針

安全確保の原則に従い、以下を安全設計の基本的な方針とする。

(1) 平常時における放射線防護

平常時における公衆及び従事者に対する放射線防護のため、施設には放射線しゃへい、換気、並びに適切な浄化・希釈性能を有する排気設備及び排水設備を備えるとともに、トリチウム等の放射性物質を内蔵する機器等の使用・環境上の条件を考慮して、それらからの漏洩を制限する。

また、放射線管理及び防護活動のための適切な施設並びに器材を備えること。

この基本方針に基づき、安全設計において以下を考慮すること。

- ① 施設で発生する放射線に対して、適切な放射線しゃへいを備え、作業区域及び敷地周辺での放射線量率を適切に低減する設計であること。
- ② 放射性物質を内蔵する機器等からの放射性物質の漏洩防止、放射性物質による汚染の拡大の防止、作業雰囲気中の放射性物質濃度、周辺環境への放射性物質の放出量及び周辺環境での放射性物質濃度の低減を図る設計であること。
- ③ 従事者に対して適切な放射線管理を実施するため、被ばく線量、汚染状況等の監視、除染等のための放射線管理施設を備えること。これらは、必要に応じ遠隔での操作が可能な設計であること。なお、トリチウムに対する放射線管理は、トリチウムプロセス研究棟等の既存の施設における実績を参考にすること。

ITER 施設で講じた施策により、公衆に放射線障害を及ぼすおそれがないことを確認するために、以下の評価を行うこと。

公衆への放射線被ばくを合理的に達成できる限り低く維持する設備の性能の妥当性を確認するため、排気・排水に伴う放射性物質の放出に起因する年間実効線量当量及び施設から放出される放射線（直接放射線及びスカイシャイン放射線）による年間の線量が ALARA の精神に基づき設定した目標（年 100 μ Sv）を満たすことを評価すること。

なお、排気・排水に伴う放射性物質の放出に起因する年間実効線量当量の評価に際しては、通常運転時及び保守・補修に伴い放出する全ての放射性核種及び放出経路を考慮すること。

(2) 事故の発生防止

放射性物質を内蔵する機器等にあつては、2.2 節に示したエネルギー、使用・環境上の条件及び真空容器内の試験機器の試験条件を考慮して、その構造的健全性を確保するとともに、内蔵される放射性物質が機器等の外部に異常に放出することを防止すること。

また、ディスラプションによる荷重は、その発生頻度に応じ設計条件として考慮すること。

なお、放射性物質を内蔵する機器等の設計、製作及び検査については、それらの構造強度を確保する上で適切と認められる規格・基準等によること。

この基本方針に基づき、安全設計において以下を考慮すること。

- ① 放射性物質を内蔵する機器等の材料の選定、設計、製作及び検査は、適切と認められる規格・基準等に従い行うこと。
- ② 放射性物質を内蔵する機器等は、適切な耐震性を確保するとともに、試験機器の使用条件等を考慮し、想定される荷重に対してもその構造健全性を維持できる設計であること。
なお、構造健全性を維持するために、必要に応じて圧力逃がし機構を設けること。圧力逃がし機構は、放射性物質を内蔵する機器等の過圧時に確実に動作し、異常な過圧を適切に防止できること。このため、動的機器については多重性を有する設計であること。
- ③ プラズマに面する壁（対向壁）の温度上昇に伴う放射性物質の放出を低減する観点から、必要に応じて対向壁の温度を制限できる設計とすること。
- ④ 放射性物質を内蔵する機器等を構成する機器の構造健全性維持を確認できるよう、試験・検査が可能な設計であること。

(3) 事故の影響の緩和（コンファインメント施設）

放射性物質の異常な放出を伴うような事故を仮定しても、放出放射性物質の環境への異常な放出を防止できるよう、コンファインメント施設を設けること。コンファインメント施設は、放射性物質を内蔵する機器等の破損等により放射性物質が機器等の外部に放出した場合に、当該機器を取り囲む区画（コンファインメント区画）を周囲から適切に隔離し、この区画内を負圧に維持するとともに、区画内の雰囲気を浄化し、環境への放出経路を排気筒に限定することにより、公衆に過度な放射線被ばくをもたらすおそれを十分小さくできる設計であること。

この基本方針に基づき、安全設計において以下を考慮すること。

- ① コンファインメント施設は、放射性物質の放出に伴い流出する流体等の条件を考慮し、必要な放射性物質の除去機能を確保できる設計であること。
- ② コンファインメント施設は、事故時において、商用電源の利用を期待しえない場合においても、その機能及び性能が損なわれないよう、非常用電源設備からの給電が可能な設計であること。
- ③ コンファインメント施設は、事故時において、コンファインメント区画内の負圧を可能な限り確保し、放射性物質の放出経路を制限できる設計であること。
- ④ コンファインメント施設は、想定すべき地震力と事故の組み合わせに対しても放射性物質の除去機能が損なわれないよう、十分な耐震性を確保した設計であること。
- ⑤ コンファインメント施設は、動的機器の多重化を図り、起動失敗等の故障を仮定しても、放射性物質の除去機能が損なわれない設計であること。
- ⑥ コンファインメント施設は、事故の状況を把握するために必要な情報を監視できる事故時監視計装設備を有する設計であること。

ITER 施設で講じた施策の妥当性を確認するために、以下の評価を行うこと。

技術的見地からみて放射性物質の放出が最大となる事故を放出経路毎に想定し、深層防護の観点から事故時の影響緩和機能を担うコンファインメント施設の性能の妥当性を確認すること。判断基準としては、公衆の実効線量当量として5mSv（ICRPの補助的線量限度に準拠）を用いること。

事故の代表的な事象については、内蔵する放射性物質の量及びその放出の駆動力を考慮して選定すること。

影響評価に当たっては、試験機器の使用条件、化学反応、放出放射性物質の形態・性状、放出経路・移行率、除去系の性能、拡散条件等を十分に検討し、妥当な保守性を加味した解析条件とするとともに、動的機器の故障の仮定、商用電源が利用できない場合等も考慮すること。

また、漏洩トリチウム等による火災・爆発の可能性についても併せて評価すること。

なお、公衆の放射線被ばくの評価にあたっては、必要に応じ直接放射線及びスカイシャイン放射線による線量を加算すること。

想定する事故及びその影響評価にあたっては、以下に留意すること。

- ① ブランケット及びダイバータ等のプラズマに対向する機器では、温度上昇に伴う水蒸気等との化学反応或いは放射化した対向材料の昇華等の影響について、局所的な温度上昇に伴う影響も含めて十分に考慮すること。
- ② 影響評価に用いるトリチウム、放射化ダスト等の放射性物質の量は、試験装置としての運転上の柔軟性を確保するため保守的な値とすること。
- ③ 影響評価にあたっては、ITER施設の安全上の特徴を踏まえ、安全確保を目的に設置する施設以外の施設であっても、その施設の信頼性等を考慮した上で、安全機能として取り扱うことも妥当とする。

(4) 立地に対する考慮

ITER施設の予備的評価によると、技術的見地から想定し得る放射性物質の放出が最大となる事故（設計基準事故）が発生しても、公衆の実効線量当量の最大値は5mSvを超えないという結果が得られている。

一方、ITER施設は、本格的な長時間DT燃焼を行う初めての試験装置であること、及び内蔵する放射性物質の全量が地上放出すると周辺公衆に過度の放射線被ばくをもたらす得ることに鑑み、設計基準事故を超える放射性物質の放出を工学的観点から仮想し、規制上の観点から、ITER施設と周辺公衆との間の離隔の適否、並びに、敷地外における緊急時計画（防災対策）の必要性の有無を評価することとする。

今後の課題

設計基準事故を超える事故の想定及びそれに対する公衆の安全確保に係る評価の基準に関しては、以下を参考に、ITER施設の目的、安全上の特徴等を考慮して検討する必要がある。

- ① 設計基準事故を超える事故の想定にあたっては、設計基準事故（技術的見地から放射性物質の放出量が最大となる事故）を対象とし、工学的観点からこの事故を上回る放射性物質の放出を仮想すること。
- ② ITER 施設と周辺公衆との隔離の適否の評価にあたっては、「原子炉立地審査指針」及び「原子炉立地審査指針を適用する際に必要な暫定的な判断のめやす」の考え方を参考とすること。
- ③ 敷地外における緊急時計画の要否の評価にあたっては、「原子力施設の防災対策について（昭和 55 年 6 月原子力安全委員会決定、平成 12 年 5 月 29 日一部改正）」の附属資料 3「EPZ についての技術的側面からの検討」の考え方を参考とすること。

(5) 火災に対する考慮

ITER 施設は、火災発生の防止を設計の基本とするが、万一に備え、火災検知及び消火、並びに火災による影響の軽減の方策を適切に組み合わせて、火災によっても ITER 施設の安全性が確保できるよう設計すること。

この基本方針に基づき、安全設計において以下を考慮すること。

- ① 火災により放射性物質を内蔵する機器等の健全性が損なわれない設計であること。特に、トリチウムを保管・貯蔵する容器等の耐火性及び当該容器等を収納する部屋等の耐火性・不燃性が確保できる設計であること。
- ② 万一の事故発生に備え、放射性物質を内蔵する機器等は、隔離弁等により、トリチウム放出（或いは空気の流入）を制限し、かつ、機器等の周囲は必要に応じ不活性化や真空化を図る設計であること。
- ③ 事故時において、放出するトリチウムを含む水素同位体による火災が万一発生した場合でも、コンファインメント施設の放射性物質の除去機能が損なわれない設計であること。

今後の課題

真空容器及び燃料処理貯蔵施設等は、万一の事故の場合でも隔離弁あるいは周囲雰囲気の不活性化等により、水素火災を防止することとしているが、局所的な燃焼については、現在十分な情報が得られていないことから、今後、局所的な燃焼に対する考慮を検討する必要がある。

(6) 品質保証に対する考慮

放射性物質を内蔵する機器等及びコンファインメント施設の所要の信頼性を確保すること。このため、国際協力で進める設計、製作、据え付け等の各段階において、所要の性能を有していることを適切に確認できるよう考慮するとともに、ISO 規格等を参考に適切な品質保証活動を実施すること。

なお、動的機器を海外調達する場合には、我が国特有の条件である耐震性の要求を適切に反

映させる必要がある。

今後の課題

品質保証については、一義的には事業主体の問題であるが、その内容は、国が行う性能確認の内容によっても変わってくる。特に、施設検査で確認できない安全性能がある場合や、工事認可を課す場合には品質保証計画の是認が必要となる。この場合、品質保証活動自体は事業主体の範囲であるが、その活動が適正に行われる組織であることを行政が確認する方向で検討することになる。

3.4 免震構造により耐震安全性の確保を図る考え方

ITER 施設は、トリチウム等の放射性物質を内蔵するため、地震時に公衆の放射線障害を防止する必要がある。特に、トカマク施設では、動作温度の異なる複数の機器が柔軟な支持構造で支持されるため、放射性物質を内蔵する機器等の耐震性確保の観点から、免震技術を採用し機器相互間の干渉の防止と付加する加速度の軽減を図ることとしている。なお、ITER 施設では、一般建家・建築物で実績が多い積層ゴムによる水平免震を適用することとしている。

免震技術の適用にあたっては、地震時における放射線障害の防止を図るため、以下の基本方針に基づくことが求められる。

放射性物質を内蔵する機器等は、地震により閉じ込め障壁が破損し内蔵する放射性物質の放出を防止するため、十分な耐震性を有すること。さらに、万一の事故時に稼働するコンファインメント施設については、本施設の機能が必要な期間中に発生が想定される地震に対しても十分な耐震性を確保すること。

この基本方針に基づけば、耐震（免震）設計においては以下を考慮することが必要である。

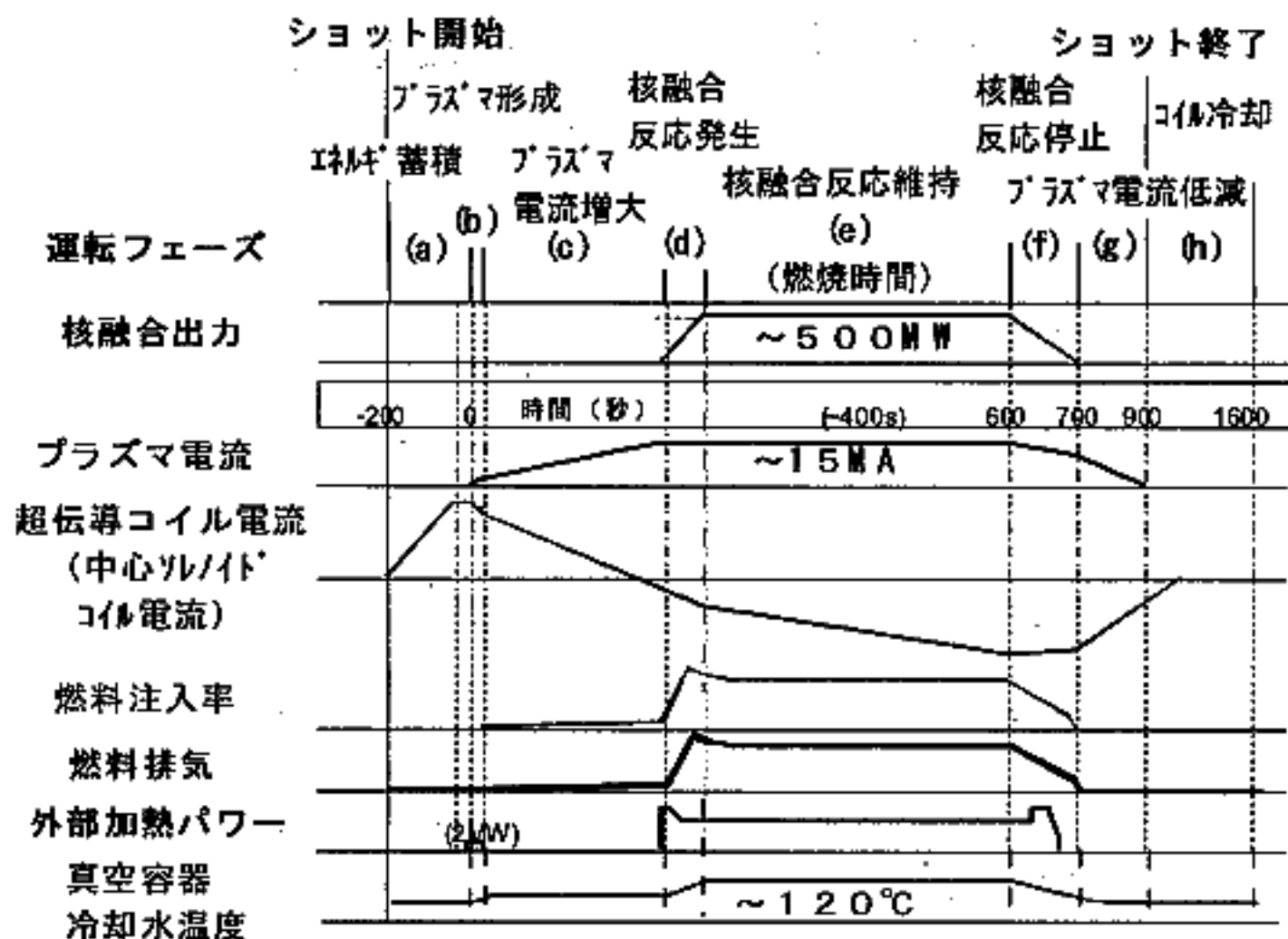
- ① 放射性物質を内蔵する機器等やコンファインメント施設等の重要な安全機能を有する施設は、安定な地盤に支持すること。
- ② 重要な安全機能を有する施設については、ITER 施設における放射線による環境への影響を考慮し、適切な地震力を定めること。
- ③ 免震設計を行う施設にあつては、免震装置に支持される上部構造は免震機能が発揮されるよう十分な強度・剛性及び耐力を有する構造とすること。この際、免震装置の特性を考慮して、やや長周期領域における地震力の影響を適切に考慮すること。

また、免震装置は、間接支持構造物とし、上部構造に要求される耐震性に応じ、その健全性を確保できるように設計すること。

今後の課題

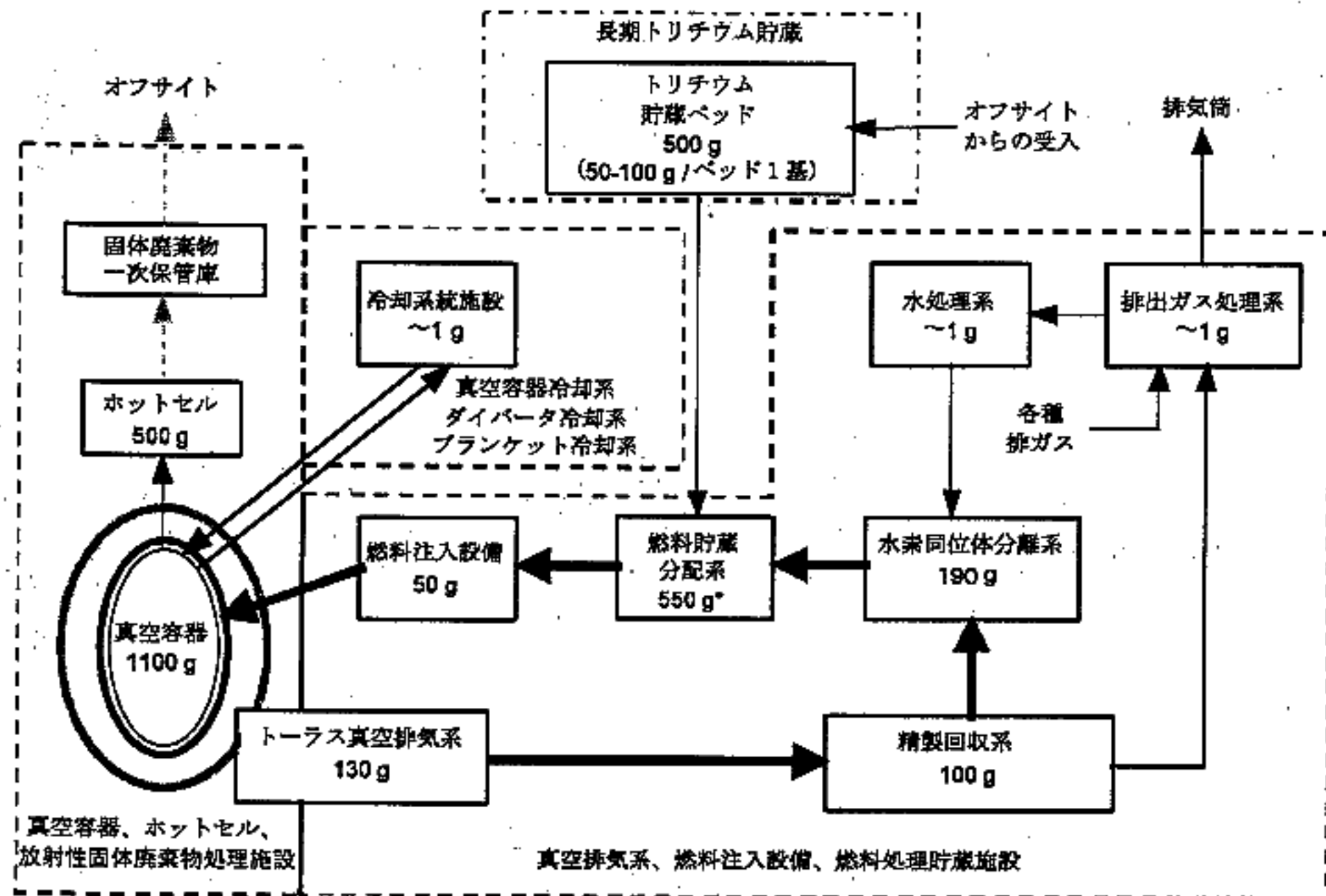
- ① コンファインメント施設の機器については、特に、地震時に要求される動的機器の機能の実証に関して、振動試験等の実績を含め、今後検討が必要である。

- ② ITER 施設は、安定な地盤に支持することとしているが、安定な地盤に要求される要件については、特に ITER 施設の立地地点における地盤と免震構造の相互作用と裕度等を適切に考慮し、検討する必要がある。



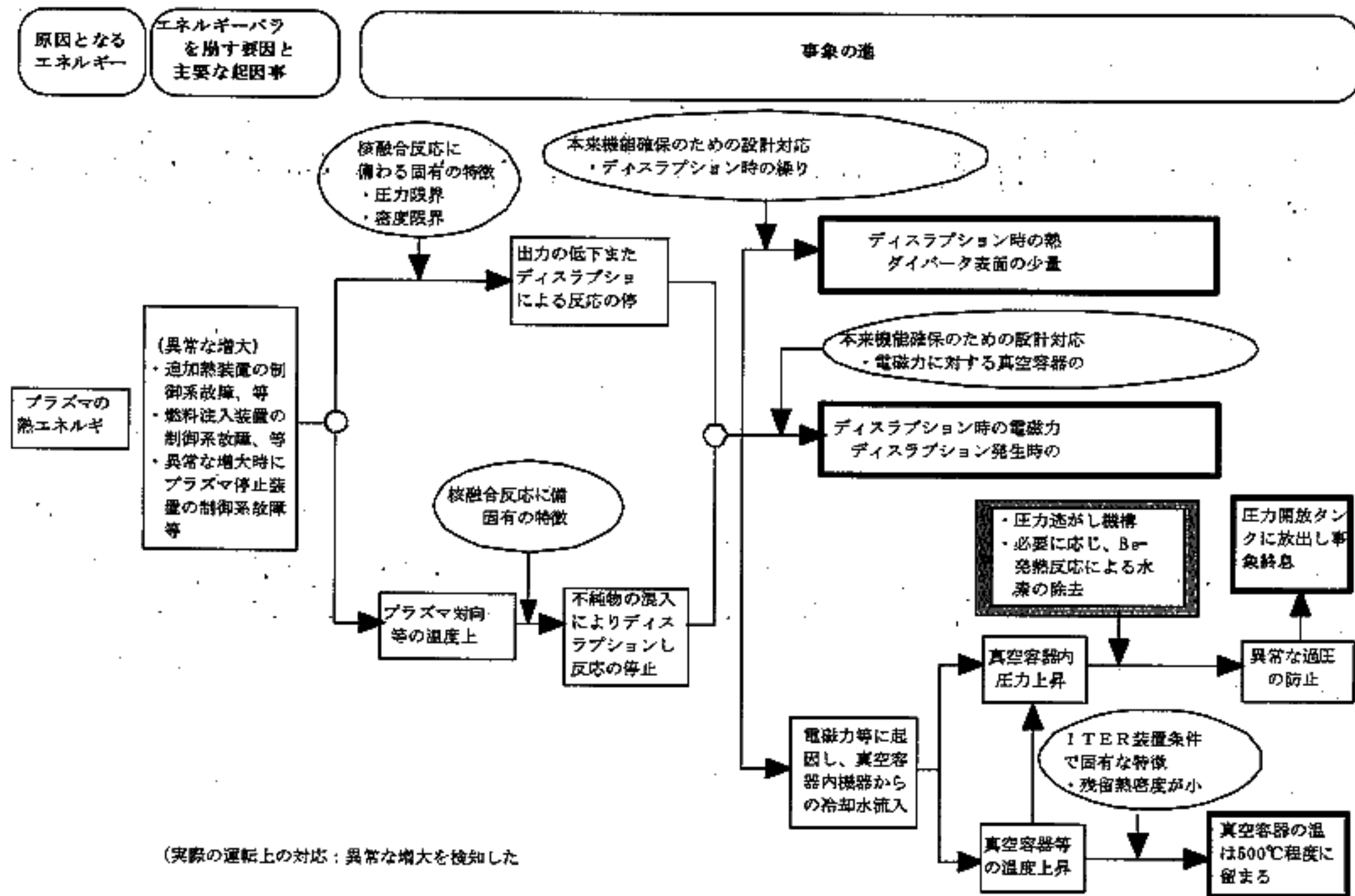
ITER 標準運転モードの代表例

- (a) 中心ソレノイドコイルを通電し、プラズマ形成のためのエネルギーを蓄積
- (b) 真空容器に燃料を入れ、外部からの加熱により中性ガスを電離させた後、中心ソレノイドコイルの電流を変化させて放電を起こし、プラズマを形成
- (c) 中心ソレノイドコイル電流の変化を継続し、トランスの原理でプラズマ電流を増大
- (d) 外部加熱によりプラズマを1億度程度まで加熱、同時に燃料を注入し核融合反応を発生
- (e) プラズマの温度、密度を一定に維持し、核融合反応を維持（標準運転で約400秒）
- (f) 燃料注入率を減らして、核融合反応を停止（プラズマは維持）
- (g) 中心ソレノイドコイルの電流を(c)と逆方向に変化させ、プラズマ電流を低減し、プラズマの運転を終了
- (h) 中心ソレノイドコイル電流の変化による発熱で温度が上昇したコイルを冷却



ITER 施設内保有量

*: 回収のための最大容量。貯蔵ベッド
1基当たりの貯蔵容量は100 g



検討経過

本報告書は、日本、欧州及び露国の3極協力で進めている国際熱核融合実験炉（ITER）の工学設計活動を通して取り組められた概要設計報告書を踏まえ、日本原子力研究所那珂研究所が作成した「ITER施設の安全設計について」（平成12年5月）に基づき、ITERの安全規制に係る技術的事項の基礎となる安全確保の考え方について検討した結果を取り纏めたものである。

検討の経過において、平成11年10月から科学技術庁原子炉安全技術顧問の会合を計4回開催し、下記に示す当該技術顧問の専門的意見を求めた。

記

岡	芳明	東京大学大学院工学系研究科教授
香山	晃	京都大学エネルギー理工学研究所教授
	小佐古敏荘	東京大学原子力研究総合センター助教授
○	近藤 駿介	東京大学大学院工学系研究科教授
	齊藤 正樹	東京工業大学原子炉工学研究所助教授
	早田 邦久	日本原子力研究所東海研究所副所長
	西 好一	財団法人電力中央研究所我孫子研究所地盤耐震部長
	濱田 泰司	核融合科学研究所教授
	藤田 隆史	東京大学生産技術研究所教授
	本間 俊充	日本原子力研究所東海研究所副主任研究員
	宮本 霧子	放射線医学総合研究所第4研究グループ主任研究官
	山本 一良	名古屋大学大学院工学研究科教授

「核融合エネルギーの技術的実現性 計画の拡がりと
裾野としての基礎研究に関する報告書」から抜粋
(原子力委員会核融合会議、平成12年5月)

4.2 ITERの科学的・技術的波及効果

ITERを中心に据えた核融合研究開発はエネルギー開発を目的とするものであって、それ自身がエネルギーセキュリティの観点から価値があることは第1.4節で議論したが、本節では直接的なエネルギーセキュリティ以外の視点からITERと核融合開発のもたらす効果を検討する。

4.2.1 核融合研究とITERの科学技術的な位置づけ

エネルギー源の開発という最終的な目標の他にも、そこに到達する研究の過程で、核融合には広範な学問や科学技術を牽引する原動力としての意義が認められる。すでに核融合開発はプラズマ物理学及び各種工学の分野では我が国の学会において重要な地位を占める一方、国際的にもフロントランナーとして高い水準にあり、またそれらに支えられた産業技術も高度化を進めていて、我が国の科学技術と学問の進歩に大いに貢献している。

核融合は、多くの工学分野において従来にない先端的な性能が要求され、研究開発、技術開発によってそれらを達成してきた。例えば、強磁場超伝導大型コイルの開発は超伝導材料工学、極低温工学、冷凍機技術、電気工学等の分野新しい領域を開いてきた。

炉工学は、これまでに学問的に正しい理解、新しい知見、情報、基礎データを提供してきた。また、既存の学問分野でも新しい研究テーマとなってその分野を活性化したり、新しい分野を開拓してきている。表4.2.1-1に核融合炉工学各分野と、それらが先端的な開発を行ったために進歩に貢献した工学の各分野の例をまとめる。

表 4.2.1-1 核融合の炉工学が関係する学問分野

超伝導	熱力学、熱工学、低温材料、電気工学。
NBI	電気工学(イオン工学)、原子分子、プラズマの物理。
RF	電磁力学、量子物理学、電気工学。
耐熱機器	伝熱流動熱工学、機械工学、化学工学。
ブランケット	金属工学、材料化学、熱工学、機械工学、核工学。
炉構造	建築、土木工学、機械工学、計測制御工学、ロボット工学、放射線工学。
燃料給排気	真空工学、計測工学、電気工学、機械工学、低温工学、材料工学
トリチウム	化学工学、電気化学、物理化学、分析化学。
材料	冶金工学、金属工学、材料工学、固体物理。
中性子	加速器工学、応用物理。

これらは、基礎的な研究を目的として行ったものではなく、ITERの開発で必要となる先端技術を目的とした開発の過程で進歩がみられたもので、今後、ITERの実機の製作、運転を行う段階でもさらなる進展が期待されるものである。特にITERでは従来にない規模でのシステムの統合があり、これによってシステム工学、制御工学の面でも新たな進歩が予想される。

核融合炉の要素機器が技術開発の目標となることによって、個々の技術分野が進歩することの他に、科学技術全体のポテンシャルを高める効果も期待される。最先端の性能が要求される装置は、一般民生用よりもむしろ、他の分野の先端技術開発や基礎科学研究の進歩に寄与することが多い。加速器や超伝導技術、計算機シミュレーション技術や測定技術、不純物除去技術、大型・精密装置の設計製作技術などは、核融合単独ではなく他の物理や宇宙、材料、生物関係の広い範囲の科学技術の発展に貢献しうる。

また、特定の装置の開発を目的とする工学は、専門性が高い応用工学であるが、実際には多くの先端的な開発に伴う基礎的な理学工学分野へのポジティブなフィードバックが経験されてい

る。これは、先端技術による大型開発が実現すると、それまで地上では観測され得なかった新しい現象や人工的環境を実現し、新しい学問対象、分野が出現するためであり、これによって刺激された基礎科学はまた応用工学を生む。このサイクルが学問、人材養成、教育、産業技術の進歩の温床となる。核融合工学では ITER による燃焼プラズマと、それに付随した極限環境を実現するため、こうした効果が起こることが期待される。この効果は長い時定数を持つものであり、必然的に世代間での技術、学問の伝達を含んでいる。

科学技術体系の中での核融合研究の関係を、図 4.2.1-1 に模式的にまとめた。このような技術的求心力を持った総合装置という意味で ITER は核融合開発についてだけでなく科学技術の意味でも意義は大きい。単に学問の 1 分野としてだけではなく、国際間、世代間、学問と産業との連係の中での科学技術発展のコアとして長期的、間接的に、しかし広い範囲で影響を与え続けるものである。

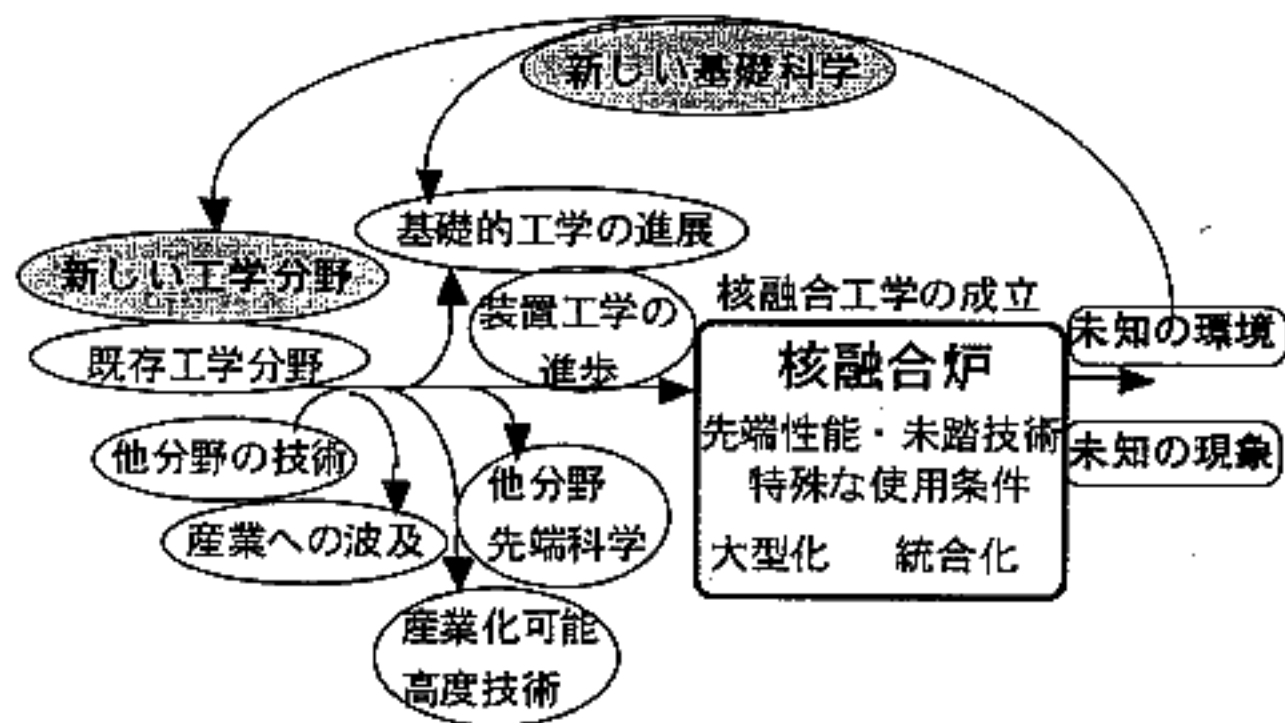


図 4.2.1-1 科学技術体系の中での核融合研究の位置づけ

4.2.2 ITER 建設の波及効果

ITER の建設に向けた研究開発の結果として実現した技術は、核融合の目的以外にも様々な分野で利用されたり、将来において利用される可能性を持っている。

核融合炉工学研究成果、特に ITER 活動開始以降の成果の他分野への波及効果は、大きく 3 種類のカテゴリーに分けることができる。

- (1) 実用化技術：既に成果が産業界に利用されているもの。
- (2) 利用可能技術：達成技術レベルが従来産業界で使われている技術を凌駕しており、成果が具体的に産業界に利用可能とみられるもの。
- (3) 共通技術：現在の開発技術が将来的に他分野に応用可能と期待できる共通基盤を持っているもの。

カテゴリー(1)の実用化技術は、既に一般に実用化された技術については産業界の技術レベルに近いものが多い。具体的には、特許またはそれに準ずる開発技術で、ライセンス契約等や商品化が行われているものがそれに該当し、派生技術とみなされる性格が強い。

一方、カテゴリー(2)の利用可能技術は先端性、先進性の強い、大きなポテンシャルの技術で

あるため、これら核融合の最先端の成果が産業界に浸透するためには早いものでも 5～10 年の期間が必要と見込まれる。

また、異なる分野の先端技術同士では、それぞれの特殊な技術要求のため特異な技術開発が進められており、技術波及の流れは一方的なものではなく、相互に影響しあっていることが多い。カテゴリー(3)の共通技術はそのような性格の技術であって、具体的な波及効果は将来可能性はあるものの現時点ではあきらかになっていない。

各技術について代表的なものを表 4.2.2-1 にまとめた。例えば、核融合で培われた超伝導技術は、大型超伝導コイルを使う加速器などの様々な分野で、線材、冷凍機、電流供給などの面で応用されており、またそれらのコストダウンにも貢献している。将来は電力貯蔵などの応用可能性がある。

表 4.2.2-1 核融合波及効果の代表例

炉工学分野	工業分野	1) 実用化技術	2) 利用可能技術	3) 共通技術
超伝導	電機	超伝導線材、装置、 冷凍機、機械工業	電力貯蔵	除染技術
ブランケット	機械、電機		タービン、液晶	中性子検出器
遠隔操作	機械	ロボット	配管、保守、溶接	原子力、 ロボット制御、
耐熱機器	機械		ボイラー	スペースブレーン
燃料給排気	真空、計測	質量分析器		
トリチウム	半導体、化学	乾燥ガス、ポンプ	再処理、水素	クリーン、 バイオ技術
NBI	半導体	イオンビーム	LSI、 太陽電池の製造	半導体製造
RF	窯業	発振管	セラミック加工、合 成	レーダー、通信、 送電
材料	金属		ボイラー、 タービン	
中性子	医療、加速器			
プラズマ応用	廃棄物処理、 半導体			

また、プラズマ加熱用の中性粒子入射装置のイオンビームは、特に従来にない大電流、大面積であり、産業用の半導体や液晶製作に応用されている。図 4.2.2-1 にその原理を示す。

同じくプラズマ加熱に使用されるミリ波帯のジャイロトロンは、これまで難しかった複雑な形状のセラミックの接合、焼結の装置として商品化されており、今後は、半導体の材料や人工ダイヤモンドなど高機能新材料のプラズマ化学合成や表面加工、また将来的にはレーダーやエネルギー伝送への応用が期待できる。(図 4.2.2-2)

この他にも、ITER の遠隔操作用に開発された高真空、ロボット技術は原子力や真空環境用のメンテナンス装置などに実用化され、また真空技術やトリチウム技術では排気ポンプやガス分析計、ガス処理精製技術がそれぞれ工業的に使われている。

核融合炉工学は、先端性の強い応用工学をシステム化する性格が強いが、以上みてきたように、

- ・身近な技術への波及
- ・先端技術としての他分野への影響、
- ・基礎的な学問への貢献、活性化

のそれぞれについて大きな成果をこれまでにあげてきたことが認識される。核融合開発で達成された技術は現在最先端の性能、極限環境を対象とした物が多く、コストが高い一方需要は限られているので、一般産業用の技術よりは、他分野の研究開発などの将来技術が多い。例えば、高エネルギー物理、宇宙、環境などの分野で核融合の成果が利用されている。しかし、宇宙開発の過程で合成された新素材が現在一般民生用に使われているように、核融合研究の波及技術の幾つかは、数十年後に広く使われる可能性が高い。

これらの成果は、波及効果や基礎的な研究を目的としてあげられたものではなく、核融合実験炉という具体的な目標のための研究開発の結果として発生したものであることに留意する必要があると思われる。今後、ITERの実機の製作、運転を行う段階では、より一層こうした波及技術の発生は加速するものと期待できる。

核融合研究開発には、科学技術の振興、産業技術への波及効果のような直接の効果とともに、教育、研究および人材育成の観点からの効果も期待される。核融合研究開発自体が、従来技術を超えた性能をもつ装置や技術を要求するために、その研究開発に従事する大学、研究所、産業において技術者、研究者を育成しており、それらの人材は核融合分野のみではなく、広い分野に核融合で培った先端の工学、技術を浸透させることとなる。大学は研究者の育成の観点からも研究テーマが必要であり、企業においては自社による商品化のリスクを負わずに先端技術を製品に応用する機会が必要である。この意味で、核融合炉の開発は、我が国の技術力の向上に貢献している。特に核融合研究は、ITER/EDAに見られるように国際共同作業が活発であり、人材育成の面では技術力と共に国際性でも有効な分野である。さらに、ITERの国内立地による人材育成面での効果として、国際的な科学技術者の日本への長期にわたる滞在と我が国学会、産業界との交流をもたらし、国際的な人的ネットワークの構成効果が期待できる。これは現在のITER参加国に限らず、核融合エネルギーの導入に興味を持つ、途上国を含む多くの国々の科学者、技術者の滞在、交流も含むもので、我が国が広範な科学技術分野において国際的な求心力を得る機会を与えるものと言える。

高エネルギー水素負イオンビームによるシリコン薄膜製造技術

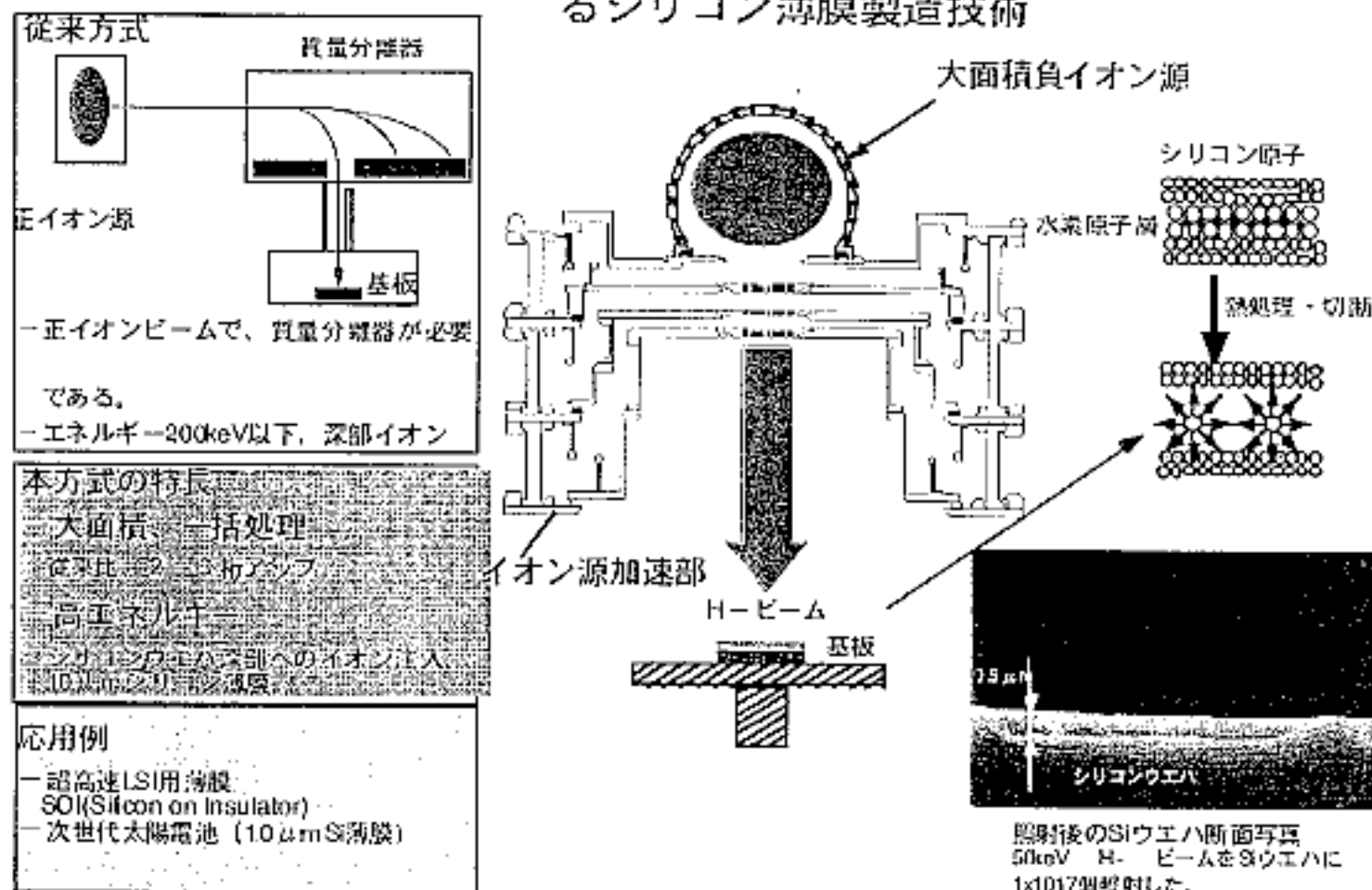


図 4.2.2-1 プラズマ加熱用中性粒子入射装置の負イオンビームの応用例。

プラズマ加熱用の負イオンビームの応用例として、シリコン単結晶を簡便にスライスする技術がある。これは、大電流で収束性の良い水素負イオンビームをシリコン単結晶基板に直接照射し、水素による剥離（デラミネーション）現象を利用してシリコン薄板を剥ぎ取るものであり、世界で初めて10ミクロンの均一な厚さを持つ単結晶薄板をつくることに成功した。効率の高い太陽電池や、次世代集積回路の半導体基板としての応用が期待される。

核融合用RF源の開発と応用 1

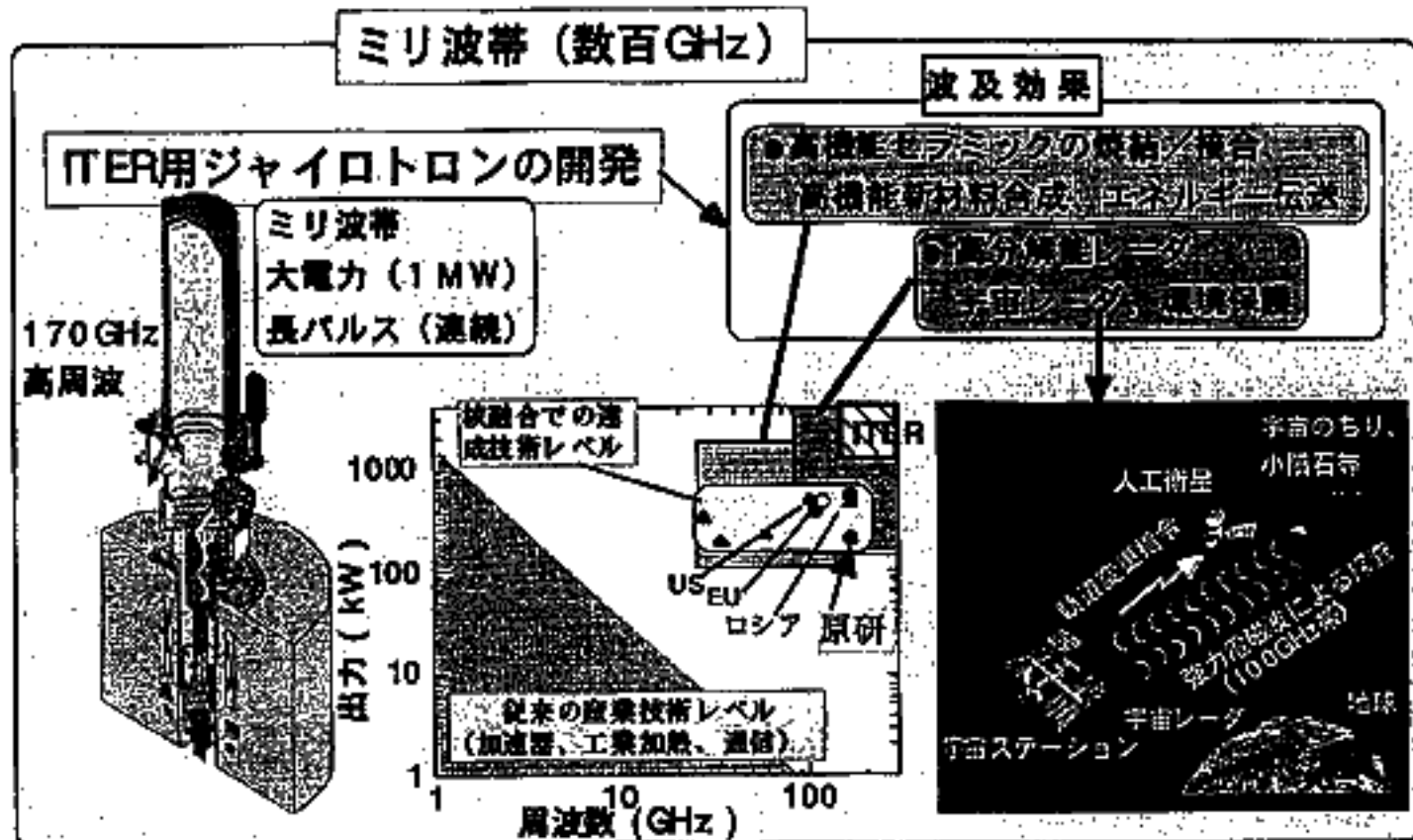


図 4.2.2-2 プラズマ加熱用高周波技術の波及効果。

ITER や核融合研究用に開発してきた高周波（RF）源技術は従来技術にくらべ、周波数や電力が、1 から 2 桁大きく、既に、クライストロンは加速器に、ジャイロトロンは複雑な形状のセラミックスの接合・焼結装置として商品化され、今後は半導体、人工ダイヤモンド等の高機能材料の製造への応用、さらに、将来は、ミリ波の特徴や大電力の特徴を活かし宇宙レーダーやエネルギー伝送への応用も期待できる。



特集

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

森野 信幸, 小川 雄一¹⁾(日立プラント建設株式会社, ¹⁾東京大学大学院工学系研究科)

Spin-off Effects of Fusion Research and Development

MORINO Nobuyuki and OGAWA Yuichi¹⁾*Hitachi Plant Engineering & Construction Co.Ltd., Tokyo 170-8466, Japan**¹⁾Graduate School of Engineering, University of Tokyo, Tokyo 113-8565, Japan*

(Received 11 June 1998)

Abstract

It is observed that new and sophisticated technologies developed through research and development in relation to magnetic confinement fusion have been transferred to other industrial and scientific fields with remarkable spin-off effects. Approximately 10 years ago, the Japan Atomic Industrial Forum (JAIF) has investigated technical transfer and spin-off effects of fusion technologies developed in Japan. The essence of the results of this investigation as well as high technologies developed in the last decade, some of which are in the early stage of technical spin-off, are described. It is additionally explained that independent technical development conducted by our country as well as by engineers themselves is important in achieving effective spin-off. An outline of scientific spin-off effects is also described, including utilization technologies of fusion reactions besides those for energy production purposes, the progress of scientific understanding in the course of fusion research, and scientific information transfer and communication with other fields.

Keywords:

fusion reactor technology, technical spin-off effect, technology progress,
fusion reaction utilization technology, scientific spin-off effect

10.1 はじめに

核融合は、その研究が始められてからすでに40年が経過し、極めて広範な科学・技術の関連分野を包含・拡大しながら、長期の開発努力を必要とする巨大科学に発展した。その研究開発の過程では、真の意味での自主研究開発と強い創造性が要求され、プラズマ物理と工学技術が車の両輪の如く相携えて進歩してきた。核融合研究開発はまた、アポロ計画等に見られるように、高い科学・

技術目標を次々達成するとともに、それまでになかった新しい技術を生み、それらが他の分野に応用展開されて、いわゆる波及効果を生んできた。

核融合研究開発計画は、すでに日本原子力研究所の JT-60U や EU の JET で臨界プラズマ条件⁽¹⁾を達成し、実験炉段階で大きく飛躍しようとする状況にあるが、依然計画遂行の途上にある。このため、核融合技術の波及効果の最終的な姿を描けるまでには至っていないが、現

注) 核融合反応による出力と、そのプラズマ状態を維持するためにプラズマに供給される外部入力とが等しくなる条件。(Q = 出力/入力 = 1)

author's e-mail: n-morino@cm.hitachiplant.co.jp, ogawa@plasma.q.t.u-tokyo.ac.jp

時点で開発された数々の新技術が、他分野に波及して顕著な成果をあげている例が少なくない[1]。また、今後の開発段階で要求される技術の質とレベルの高さは、現段階のものを上回るものが多いため、さらに広範で大規模な波及効果が期待される。

一方学問の分野でも、核融合研究開発は多くの波及効果をもたらしている。核融合研究が開始された初期の頃には、電気工学、加速器、地球物理、天体物理等の分野の研究者が加わり、次第に研究体制が組織化され、核融合とこれらの分野の間で研究が相乗的に進展し、ソリトン物理学や複雑系科学などに核融合からの寄与が見られる。

核融合の波及効果の他の構面として、核融合反応やプラズマの利用技術がある。放射性廃棄物の消滅処理や核融合推進ロケット、プロセスプラズマ応用など、火力発電以外の用途でも核融合が多くの魅力的な可能性を内包している。

核融合がどのような学術要素や技術要素から成りたち、研究開発によってこれらがどのように発展し、どのような新技術が生まれ、核融合以外の分野でどのように役立っているかなどを知ることは、核融合研究開発の意義を多くの人々が理解する上で大切なことと考えられる。

以下では、波及効果の各種調査例と核融合技術の特徴を述べた後、磁場閉じ込め核融合技術の波及効果の1980年代時点での全体像を紹介する。次いでその後の技術進歩と他分野への応用展開状況のいくつかに触れる。最後に学術的波及効果を概観する。なお、慣性閉じ込め核融合関連技術の波及効果の紹介は、別の機会に譲る。

10.2 技術的波及効果

(1) 波及効果調査例

一般に波及効果といえば、米国のNASAや欧州のCERNが調査した宇宙開発や加速器分野に関するものがよく知られている。日本でも「宇宙技術および宇宙利用システム技術の波及効果分析」がすでに行われ、最近では原子力分野でかなり具体的な波及効果例が紹介された[2]。

核融合分野では、米国エネルギー省が波及効果を何度か紹介している[3,4]。たとえば1982年には、合計138件の波及の実例を、各項目ごとに担当者の名前や電話番号を記載して、やや羅列的に紹介した報告書を発行した[5]。またEUは、JETの開発過程で生み出された高度な技術と若干の波及状況をJETのパンフレット[6]の中で紹介し、「ヨーロッパの産業界がJETの建設に参加することにより、先端技術分野における産業界の能力を飛

躍的に増大せしめるとともにその競争力を増してきた。」としている。EUはまた、核融合関連企業72社にインタビューして得た56の証言を報告書にまとめ、これらの証言は核融合計画が欧州産業界の競争力増進に役立っていることを裏付けている、と結論づけている[7]。1990年には、日本、ロシア、EU、米国における技術波及の状況が、日本が取りまとめ役となって作成されたりポートの形で、IAEAから紹介された[8]。各極が披露する内容に、それぞれのお国柄が出ていて興味深い。

日本では1986年に、日本原子力研究所の委託により、日本原子力産業会議（以下「原産」）の内部に設置された「核融合波及効果調査委員会」（委員長：山本賢三名古屋大学名誉教授）が、3ヶ月にわたって調査を実施した。この調査は、日本で初めて、核融合技術の波及効果をシステマティックに調査したものとして意義がある。調査結果は240頁の報告書[1]の形で公表され、核融合技術そのものの説明や波及効果の具体的な内容を、一般の技術者を対象に記述したものに加えて、波及状況の全体的な傾向を分析した結果が紹介されている。その概要は英文版でも公表された[9]。日本における当時の波及状況は、日本原子力研究所の核融合成果報告会、本学会の第1回専門講習会[10]、電力会社のカルチャー講座など、各種の講演を通じて紹介されたほか、米国や南米などにも披露された[11]。

1990年には、電気学会に設置された専門委員会が波及効果に関する技術報告書をまとめ、主として核融合新技術の紹介を行った[12]。

(2) 核融合技術とその特質

核融合発電システムは、知識集約型巨大システムの典型であり、その建設には、数々の分野の在来技術に加え、“超”や“極”の付く技術を含む、いまだかつて人類が手にしたことのない極めて先進的な技術を数多く必要とする。巨大技術と精密技術が共存することも、核融合技術体系の一つの特徴である。

Fig. 1に、トカマク型核融合炉の一例として、日本・EU・米国・ロシアの四極国際協力計画：ITER（国際熱核融合実験炉）本体の断面を、Table 1に磁場閉じ込め核融合炉システムを構成する機器とこれらに関連する技術群を、Table 2に核融合を支える先端技術の具体例を示す。

(3) 核融合技術波及の全体像—1980年代の状況

原産の調査報告書を基に、1980年代の波及状況のあらましを紹介する。

Table 1 磁場閉じ込め核融合炉システムを構成する技術群

構成機器		主要機器		関 連 技 術	
本 体	真空容器	プラズマ	超高真空保持	超高真空技術、大型磁体製造・高精度造形技術	3次元透過
	超伝導マグネット	閉じ込め	プラズマ位置・形状制御	超伝導技術、極低温技術	電磁解析技術
	第一壁	エネルギー	高エネルギー粒子からの防護	高熱負荷除去技術、耐熱・耐スパッタリング材料技術	耐放射線
	ブランケット	-交換	燃料増殖	トリチウム回収技術、温度制御技術、液体金属MHD技術	材料技術
	遮蔽体	放射線	遮蔽	遮蔽技術（超伝導マグネット、生体など）、放射線輸送解析技術	
真 空 排 気 装 置	ダイバーク	不純物	高熱負荷の除去	高熱負荷除去技術、耐スパッタリング材料技術、直接冷却MHD技術	
		除去	真空排気	超高真空技術、超大型真空ポンプ技術、トリチウム回収技術	
クライオスタット		超伝導マグネットの冷却、生体凍結		極低温技術、真空技術	
本体支持機構		本体の變形吸収・支持免震		超重量物の變形吸収・支持技術、耐震・免震技術	
プラズマ 加熱装置	中性粒子入射 方式	プラズマ加熱 プラズマ電流駆動		高エネルギービーム技術、高効率イオン生成技術、 極低温技術	高エネルギー 中性子ストリー ミング解析技術
	高周波方式			超大型極端電圧発生技術、高効率高周波伝送技術	
燃料供給 装置	ペレット注入方式	燃料供給		超高速ペレット注入技術、極低温技術	プラズマ中のペレット
	ガスバフティング 方式				アブレーション制御お よび予熱炉技術
電源装置	フライホイール 付き電動発電機	超伝導マグネットの励磁		大容量パルスパワー生成・制御技術	
	電力用半導体素子			大容量エネルギー貯蔵技術	
	大電流 直流電源装置	加熱装置用電力供給		大容量化技術	
計 測 ・ 制 御 装 置		プラズマの位置・温度分布・密度分布 計測		プラズマ挙動解析技術	プラズマの位置・温度・密度計測技術
		プラズマの位置・形状制御		高速制御技術	高速制御技術
		プラズマディスラプション前兆現象検出		高速データ処理技術	ソフトX線スキャンニング技術
		プラズマディスラプションの回避制御			
		マグネット励磁用電力制御		大電力高速制御技術	
遠隔保守 装置	炉内遠隔物送達 保守装置	第一壁、ダイバークの遠隔保守		超重量物の遠隔保守・交換技術	
	炉内モジュール 交換装置	ブランケット・遮蔽体の遠隔交換		耐放射線駆動・駆動装置技術 耐放射線センサ技術	
コンテナ	炉内	超重量物の収納		大型天井クレーン技術	
	炉内機器室	トリチウムの閉じ込め		トリチウム除去技術	
	下部機器室	大型天井クレーンの走行支持		耐震・免震構造技術	
熱交換器室					
保 守 室		放射化物の一時保管・保守		高放射線除去技術	遠隔保守技術
保 管 室		放射化物の保管		トリチウム除去技術 放射化物保管技術	

(a) 原産の調査方針

原産の調査は次のような考え方で行われた。

- (i) 磁場閉じ込め核融合技術の波及効果のうち、技術的
側面について調査する。
- (ii) 技術波及の方向として、核融合技術が他分野に波及
したもの(核融合→他分野)のみならず、他分野の技
術が核融合分野に波及したもの(他分野→核融合)
や、核融合と他分野との間で相互に波及しながら次

第にレベルアップしてゆくもの(核融合→他分野)
についても調査する。

- (iii) 「他分野」として、次の9分野を定義する。

エネルギー/エレクトロニクス/情報/加速器/海洋・
宇宙/ライフサイエンス/交通/一般産業/その他・共
通

- (iv) およそ1975年(JT-60のR&Dが始まった時期)か
ら2000年までの四半世紀の間に波及効果が見られた

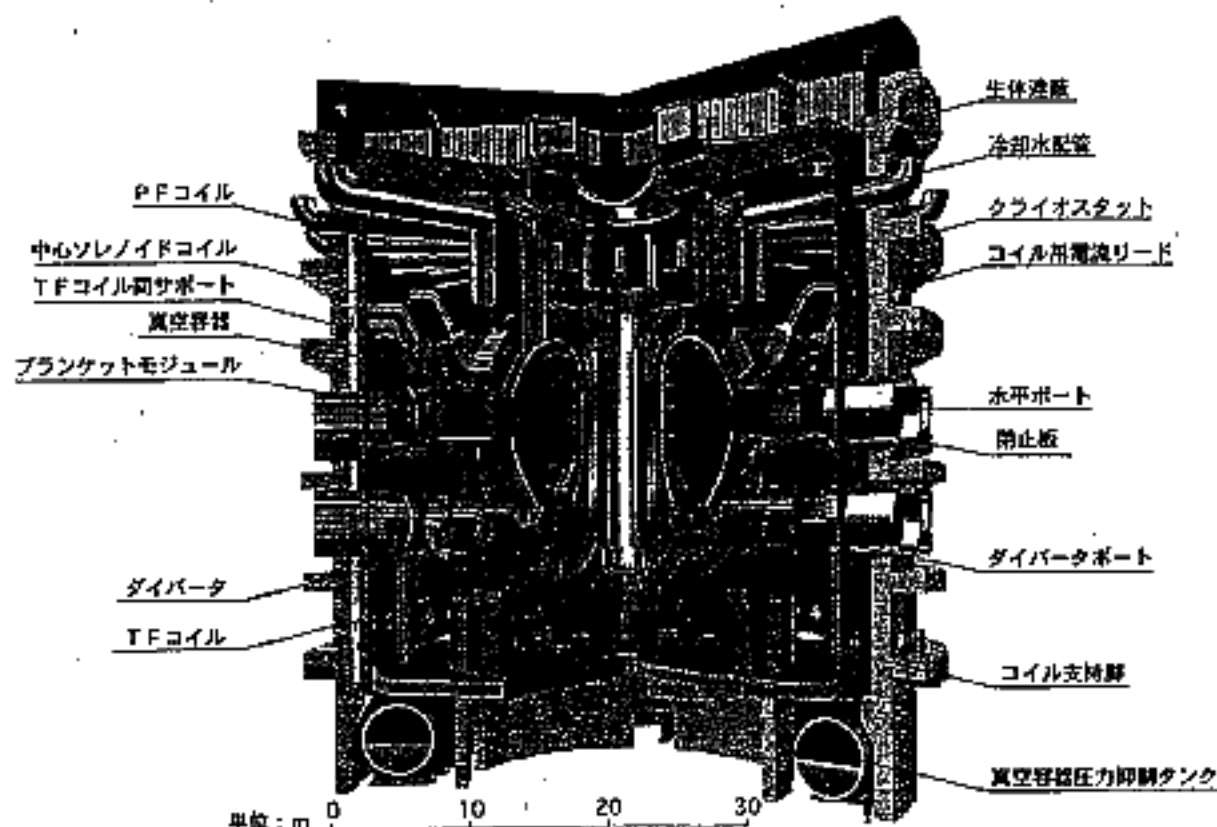


Fig. 1 ITERのトカマク本体断面説明図 (日本原子力研究所 提供)

本体直径約30 m、本体高さ約20 m、本体重量約50,000 tonの巨体である。コスト軽減のための検討が98年春から始まり、その成果が期待されている。

注：PFコイル：ポロイダル磁場コイル，TFコイル：トロイダル磁場コイル

Table 2 核融合を支える先端技術の具体例

項 目	具体的な技術の例
超伝導	大型高磁界コイル
極低温	液体ヘリウム冷凍機、クライオポンプ
超高熱負荷	プラズマ対向壁、材料表面処理
超高真空	大型真空容器、超高感度リーク検査、ターボ分子ポンプ
超大型	大容量直流電源システム、フライホイール付き電動発電機、大型電子ビーム溶接機
超高速	大電力高速制御、スーパーコンピュータ、燃料ペレット入射
高機能	遠隔操作機器、プラズマ計測、特殊機能材料
高出力	大電流イオン源、ジャイロトロン、クライストロン

Table 3 技術開発と波及効果の特徴から見た類別例

No.	要 素 技 術	方向	類 別
1	セラミック製ターボ分子ポンプ	→	課題解決型
2	改良型ヘリウムスニファ法	→	緊急対策型
3	大型超伝導直流コイル	→	知見蓄積型
4	大電流イオン源	→	強烈探求型
5	スーパーコンピュータ	→	牽引型
6	電子ビーム溶接(EBW)技術	→	強攻突破型
7	四極管	→	感 謝 感 激 型
8	クライストロン	→	
9	汎用過渡現象解析プログラム(EMTP)	→	

もの、または見られるであろうもののうち、文献等の形で公表されたものを対象とする。

(v)波及効果の内容は、波及の根幹となる要素技術別に、一定のフォーマット(「波及効果調査票」)に具体的なかつ平易に記述する。

(vi)波及効果の大きさの順にA、B、Cの3段階に評価する。

(b) 抽出された波及効果

委員会が抽出した波及効果は全部で103件にのぼり、その評価別の内訳は、「評価A」が26件、「評価B」が65件、「評価C」が12件であった。評価Aの中から、新技術誕生のきっかけや波及状況・経緯などが特徴的なものを9件選んで、類別化を試みたものをTable 3に示す。

No. 1「セラミック製ターボ分子ポンプ」は、従来の金属製のターボ分子ポンプに代わって登場したもので、強い磁界の中でも高い信頼性のもとに運転できる真空ボ

ンプを希求する過程で開発されたものである。

No. 2 「改良型ヘリウムスニフ法」は、JT-60 の真空容器の微小漏れ箇所がどうしても発見できない緊急事態の中で案出された画期的なリーク検出技術で、検出感度が一挙に4桁も向上した。現在、リーク検出法として広く活用されている。

No. 3 の「超伝導技術」は基礎技術の一つであり、詳細は後述する。

No. 4 「大電流イオン源」は、プラズマ加熱装置用として開発されたもので、これだけ高度な技術を核融合分野で開発したのだから、他の産業分野にも是非活用したい、という開発担当メーカーの強い意志に基づいて、関係者がかなりの期間知恵を絞った末の到達点であった。

No. 5 の「スーパーコンピュータ」は、プラズマの挙動や安定性解析、平衡計算など、きわめて高度な計算を高速・高精度で行うために不可欠なもので、中でもプラズマシミュレーション（計算機実験）は、理論・実験に次ぐ第三のアプローチといわれ、「計算科学」の中で重要な位置を占めている。このような高度な計算能力へのニーズが核融合分野で依然として高いことが、さらに高性能のスーパーコンピュータの開発を促している。一方、ITERをはじめとする核融合装置の工学設計の一部である「電磁気解析」、「放射線輸送計算」、「熱応力解析」等で、スーパーコンピュータの計算能力に負うところが大きい。これらの解析技術は、超伝導磁気浮上式鉄道山梨実験線の超伝導リニアモータ、送変電機器、GTO インバータ、カラーブラウン管などの広い分野で、機器の電磁場設計に活用されている。

No. 6 「電子ビーム溶接（EBW）技術」は、京都大学のヘリオトロロンEやJT-60などの大型真空容器の精密溶接を実現するために、当時の小容量のEBWの技術を、100 kWを超える規模にスケールアップすることに成功した例で、宇宙ロケット用モータケースや水車ランナーに活用されている。

No. 7 「四極管」、No. 8 「クライストロン」、No. 9 「汎用過渡現象解析プログラム（EMTP）」はともに、他分野で開発された技術が核融合分野に応用されて大きく貢献したハードならびにソフト技術の例である。

(c) 大電流イオンビーム技術の波及

波及効果の具体的な内容を数多く紹介したいところであるが、紙数の制限のため文献[10]に譲ることとし、ここでは大電流イオンビーム技術の波及の紹介に留める。

プラズマを加熱したり、プラズマの中に電流を流し続けるための装置の一つに「中性粒子入射（NBI）加熱装置」

Table 4 大電流イオン源の技術波及

要素技術	大電流イオン源	
波及方向	核融合 → 一般産業	
用途	中性粒子入射加熱装置	イオンビームミキシング装置
仕様	●水素イオン（正イオン） ●加速電圧：75 kV ●ビーム電流：35 A	●窒素イオン等（正イオン） ●加速電圧：10～40 kV ●ビーム電流：1 A
波及効果	●核融合用イオン源の開発により、一般産業分野で従来値（10mA）の100倍もの大きなビーム電流が得られるようになった。 ●このため金属やセラミックスへのイオン注入が実用規模で可能となった。	

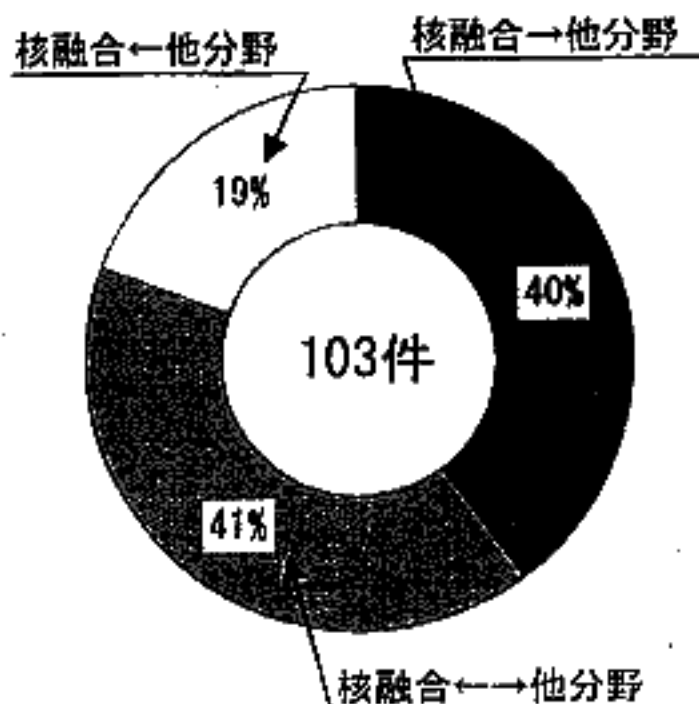


Fig. 2 波及技術件数の波及方向別内訳

がある。イオン源で作られたイオンを加速したあとと中性化して、イオンビームの形でプラズマに入射する装置である。イオンビームは、1886年にドイツで発見されてからすでに100年あまりになるが、核融合分野での研究開発により急速な技術進歩を遂げ、ヘリオトロロンEやJT-60などの「大電流イオン源」技術に結実し、それが一般産業の分野に波及して顕著な効果をあげている。その状況を Table 4 に示す。

すなわち、核融合分野で開発された、発散角が小さく均一な大電流イオンビームが得られる大口径イオン源の技術の誕生によって、表面改質や電子部品などの一般産業分野で一挙に100倍ものビーム電流が得られるようになった。このため、材料のより広い面への注入やより深

い層への注入が高精度で可能になるとともに、同時に数多くの処理が実用規模で実現した。こうして、VTRやミニディスク用磁気ヘッド、液晶や太陽電池などの電子部品、自動車エンジンや圧延ロール、ガラス工業等での材料表面改質、医療や半導体業界などへの適用が可能となった。日本における核融合技術の波及状況に興味をもったアルゼンチンは、日本からのODA技術協力のもとに、ミニプロジェクト：「産業用材料のプラズマ処理」計画を実行し、初期の成果をあげて今年終了した[13,14]。一方、ルーマニアに対する類似の技術協力計画が現在具体的な形で進められている。

(d) 全般的な考察

抽出された103件の波及効果について分析した結果を以下に要約する。

(i) 波及方向別件数分布

核融合と他分野との間の波及効果の方向別件数分布をFig. 2に示す。核融合から他分野への波及が全体の4割、他分野との相互波及が同じく4割、残りの2割が他分野から核融合への波及となっている。

(ii) 技術分野別分布

Fig. 3 (a) に技術分野別の件数分布を示す。コンピュータ・通信と材料の分野で比較的件数が多いものの、各技術分野にかなりまんべんなく分布している。これは、核融合技術が幅広い広がりをもつ技術体系をなしていることを示している。コンピュータ・通信分野では、海洋・宇宙やエレクトロニクス分野で

開発された画像処理や通信制御装置などが、核融合の情報処理システムの構築に寄与している。材料は共通基盤的な技術であり、今後の実用炉に向けた新材料の開発が様々な分野に波及することが予想される。

(iii) 他分野別分布

同様に他分野別の件数分布をFig. 3 (b) に示す。エネルギー、エレクトロニクス、加速器の分野と核融合は互いに強い関連を持っていることを示している。核融合と情報分野との関連では相互には強く関連しているが、むしろ核融合の方が情報分野から技術を強く受けているという点が注目される。これは主として高周波エネルギー技術分野で、JT-60のクライストロンや四極管が放送や通信用として開発された技術を活用したことによる。

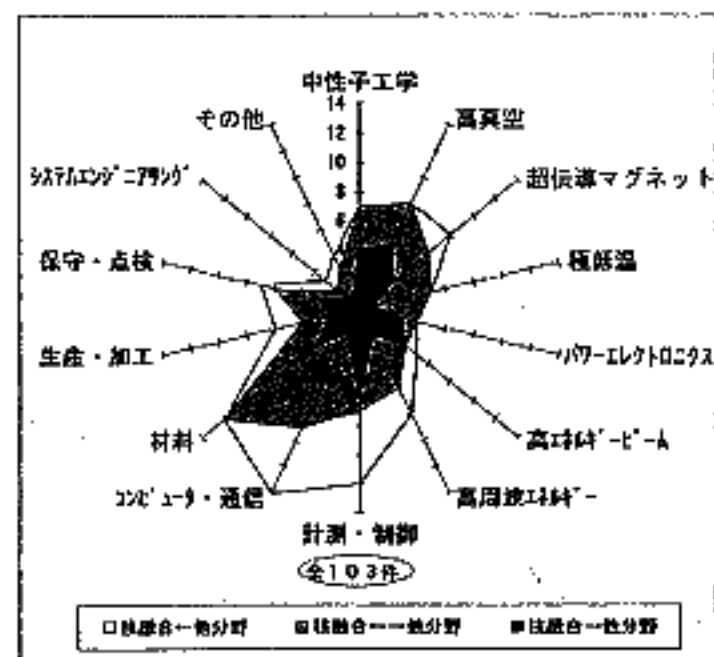
(iv) 波及の強さの相対比較

核融合と他分野間での技術波及の実態を見てきたが、全体としてどちらの方向への波及が強いのだろうか。

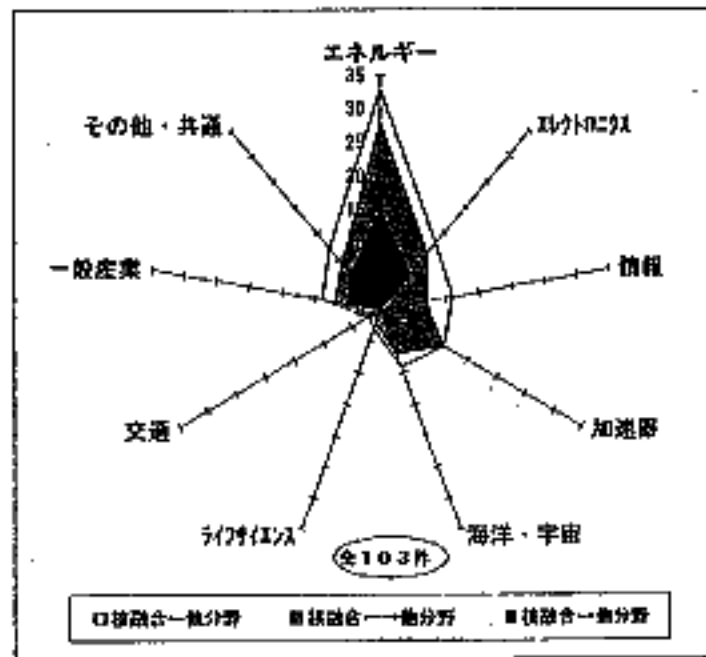
Table 5 波及効果の評価点

評価ランク	核融合→他分野	他分野→核融合
A	+3	-3
B	+2	-2
C	+1	-1

<指標値計算法> まず、抽出された103件のうち、相互波及を除く61件のそれぞれに上表に示す評価点を与える。次にそれぞれの分野別に「核融合→他分野」の評価点合計 - 「他分野→核融合」の評価点合計を計算する。



(a)



(b)

Fig. 3 波及技術の件数分布 (a)技術分野別 (b)他分野別

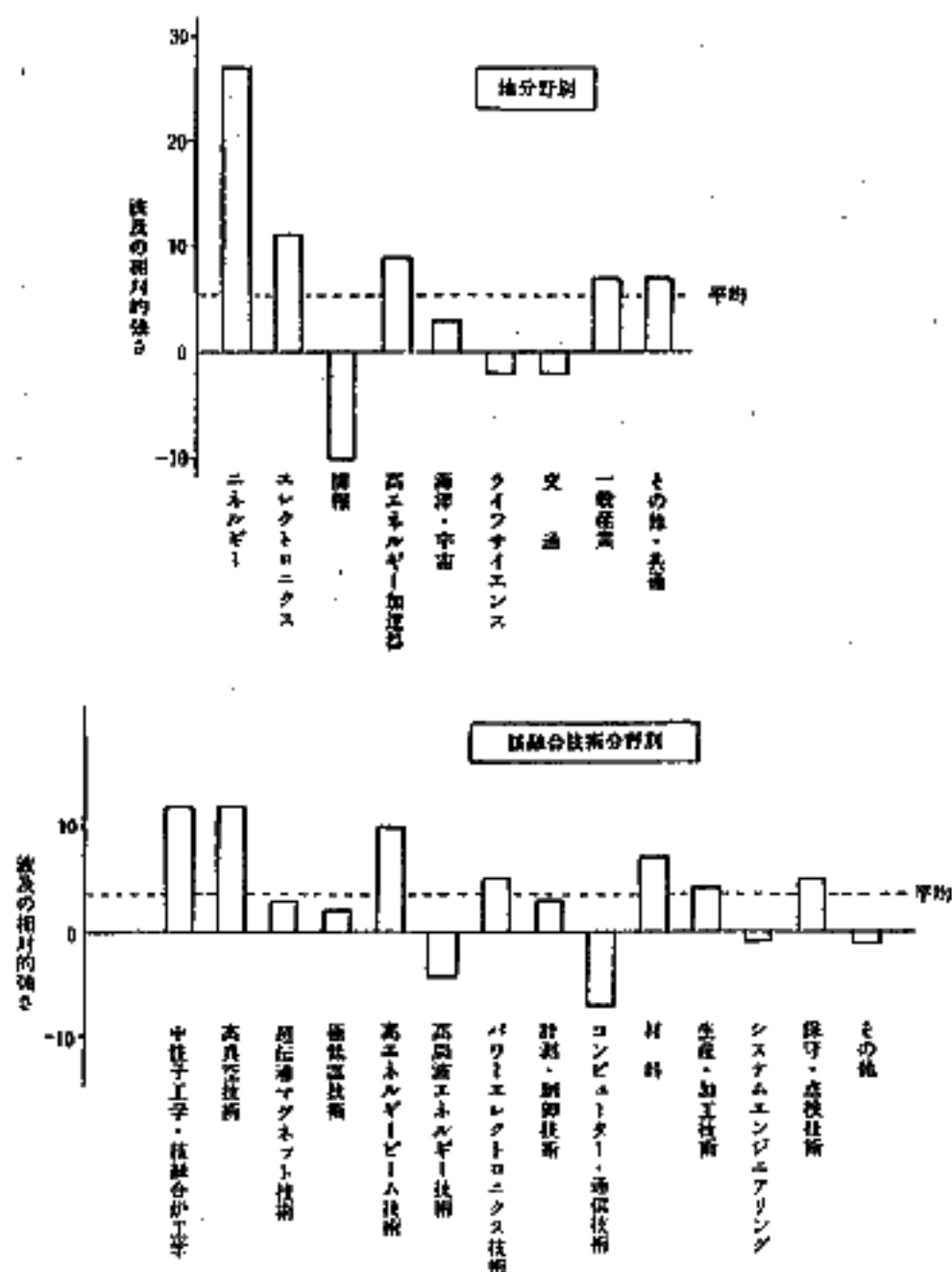


Fig. 4 波及の強さの相対比較

波及の相対的強さが正の値であることは、核融合から他分野の方向により強く波及していることを表している。

うか？その分析結果を、他分野別、技術分野別に Fig. 4 に示す。図の縦軸は、波及の相対的な強さを示す一つの指標値で、Table 5 に示す評価点を用いて算出された。

これらの図は、核融合と他分野間の波及の強さを定性的に説明している。指標値が正の分野は、核融合技術が他分野へ波及する度合いが逆の方向よりも相対的に強いことを、また負の場合は逆に、他分野の技術が核融合へ相対的に強く波及していることを示している。全体の平均値を求めると、正の値となる。このことは、過去および近未来において、核融合から他分野の方向により強く波及してきたし、今後も波及するであろうことを示唆している（一種の起爆現象）。

14) 波及効果の考え方の変遷

最近、核融合技術の波及効果そのものが本来の姿で理解されるようになったが、当初は必ずしもそうではなかった。すなわち、JT-60 が建設された1985年頃は、「核融合研究開発は波及効果のために実施するのではない。」といった、やや排他的な意見が聞かれた。その後、「核融合研究開発推進の支持を得るために、波及効果が役立ちそうだ。」との考えが核融合推進課で芽生え、産業界の少数の関係者の間で非公式な調査が始まり、その成果が発見的に前述の原産の調査活動につながっていった。この頃、一般紙が核融合の波及効果を取り上げるなど、世間の関心も高まっていた。

その後、たとえば原子力委員会核融合会議が1992年5

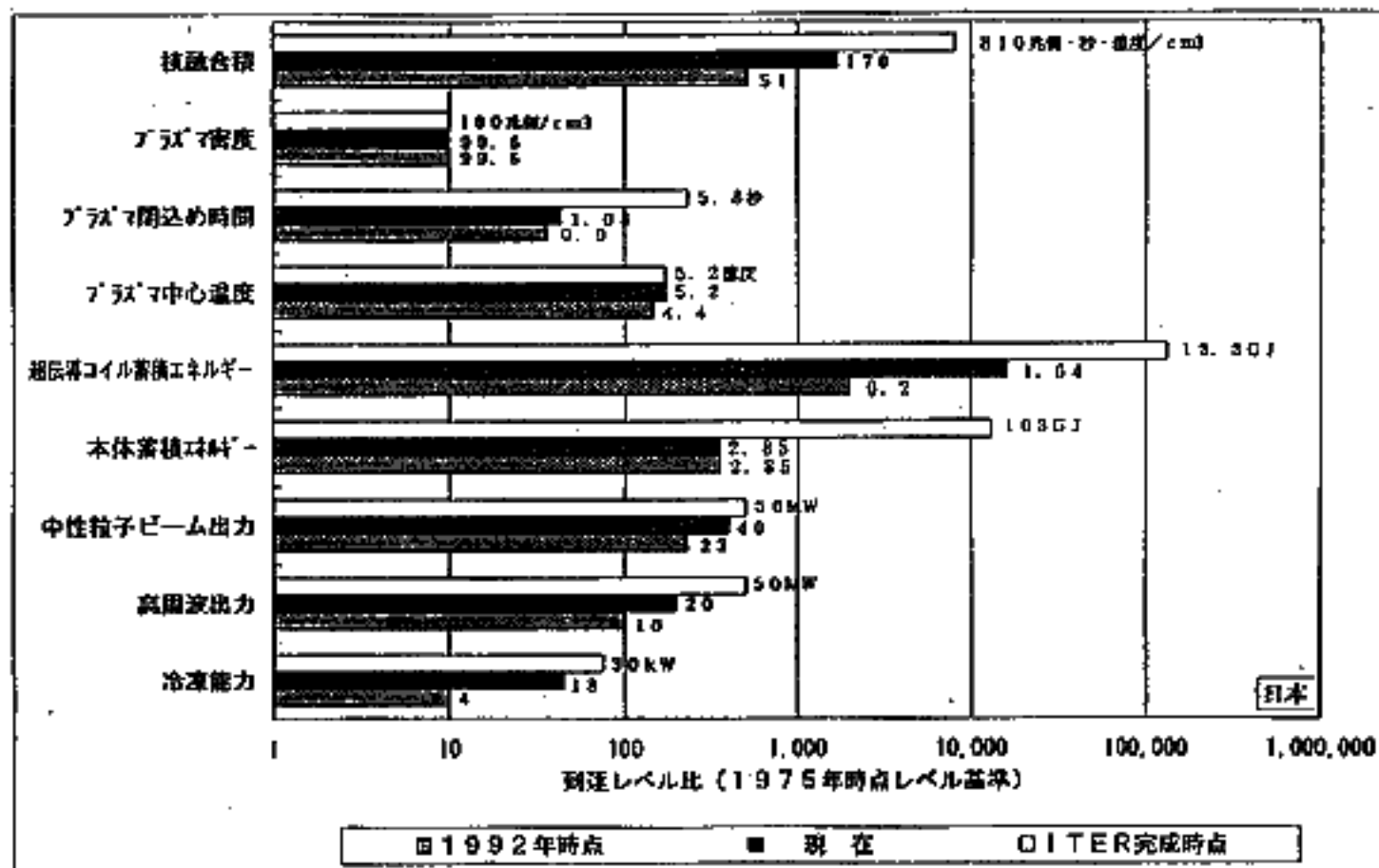


Fig. 5 炉心プラズマパラメータと炉工学技術の進歩

1975年からほぼ四半世紀の間に、プラズマ性能は3桁を超える進歩を、炉工学技術は最大4桁を超える進歩を遂げてきた。ITERの建設は、両分野でさらに1桁の進歩を必要としている。

月18日付で作成した「核融合研究開発の推進について」の中に、「産業界は、(中略) 新たに開発された技術他分野に広く波及させることに成功している。その結果として、核融合において開発された先端的・極限的技術の多くは、核融合以外の幅広い技術分野に波及し応用されて、その他の分野の技術革新を誘起し加速してきた。」と記されるようになった[11]。

(5) 最近の核融合技術の進歩

核融合技術は、JT-60の完成後も、大型ヘリカル装置(LHD)の建設、ITERの工学設計やR&Dなどを通じて着実に進歩している。以下には、1990年代に著しい進歩が見られる技術のいくつかを紹介しながら、核融合技術は現在どのレベルまで到達しているか、そしてITERの建設はさらにどれだけの飛躍を必要としているかについて述べるとともに、今後の展開を考える。

(a) プラズマ物理と炉工学のその後の進展

Fig. 5に、4つの炉心プラズマ性能に関する値と、5つの炉工学技術について、1992年時点と現時点に日本の研究開発が到達したレベルと、最近公表されたITERの工学設計(EDA)に関する「最終設計報告書」で要求

されているレベルを、1975年時点のレベルを1とした比の値で示す。

「プラズマ密度」、「プラズマ閉込め時間」、「プラズマ中心温度」については、ともに単独の達成値を示す。「核融合利得」は、これら3つのパラメータの同時達成値を掛け合わせたもので、プラズマ性能を総合的に判断するのに使われる。このうち、プラズマ中心温度はすでに5.2値度の発生に成功しており、将来必要とするレベルに到達している。プラズマ密度もこれと類似の状況にある。

1975年からほぼ四半世紀の間に、炉心プラズマ性能は大略1桁ないし3桁、炉工学技術は1桁ないし4桁の進歩をしてきたこと、そしてITERの工学設計は、両分野でさらに1桁の進歩を要求していることを本図は示している。

炉工学技術のうち、超伝導コイルの技術進歩がほかのものに比べて飛び抜けて大きいことがわかる。LHDの完成で、1.640 MJのヘリカルコイル(Phase II)の技術を手に入れば、1992年時点のLCT(大型コイル事業)の200 MJからほぼ1桁飛躍したことになる。ITERはさらに1桁弱の飛躍を必要としているが、超伝導技術の

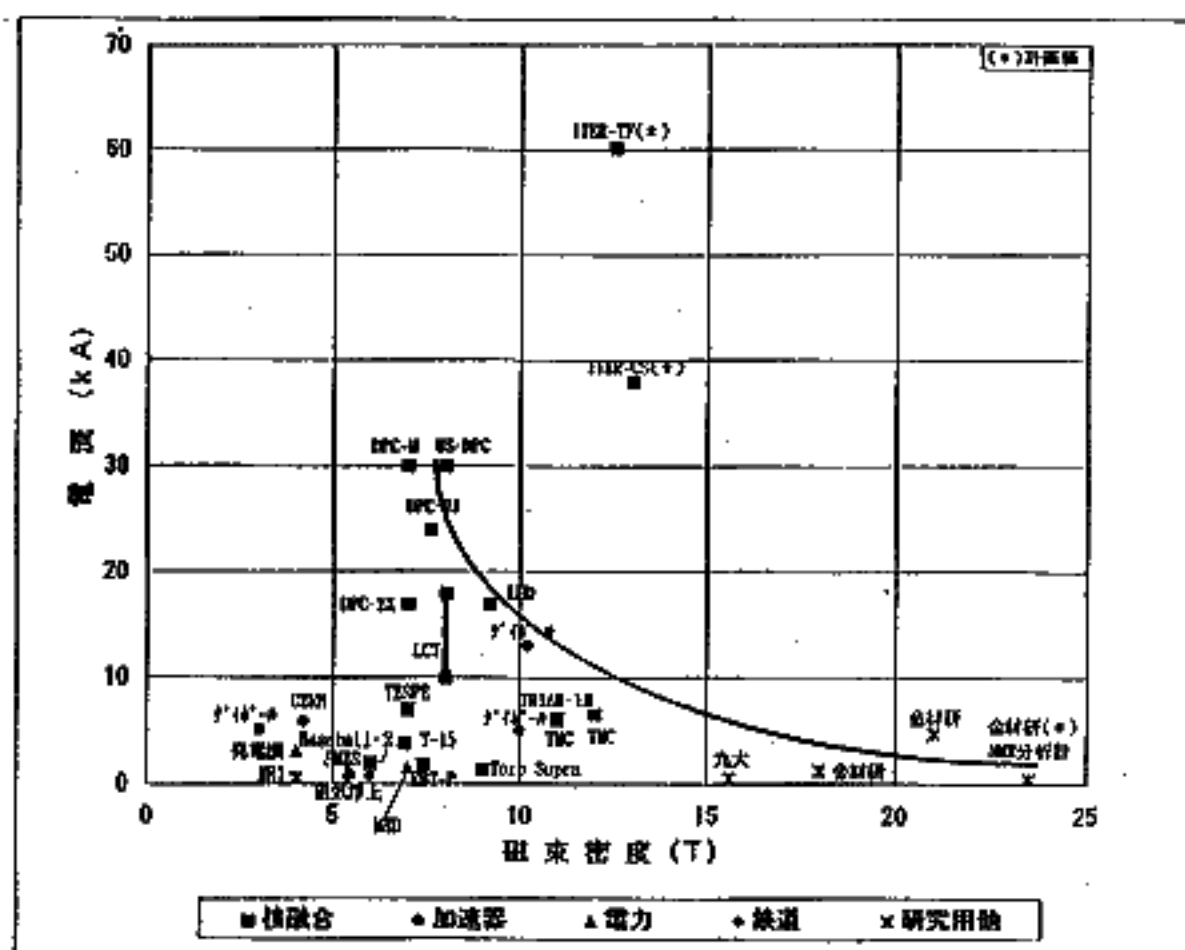


Fig. 6 超伝導マグネットシステムの電流比較

ITERの超伝導マグネット他分野のものとはかけ離れた大きな電流性能が要求される。

段階的進歩を可能にしたLLHDの果たす役割は大きい。トカマク本体の規模の増大状況を知るための一つの目安として、本体に蓄えられている磁気エネルギーの大きさを見ると、1985年のJT-60完成後この値は変わっておらず、ITERの完成で約40倍のレベルに飛躍することになる。

(b) 超伝導技術の進展

核融合装置用と他産業の代表的な超伝導マグネットについて、その電流と蓄積エネルギーを磁束密度に対してプロットしたものを、Fig. 6とFig. 7に示す。電流で見ただけの場合、ITER用の2種のコイル（トロイダル磁場コイル：TFおよび中心ソレノイドコイル：CS）は、従来の核融合装置や他の分野のものに比べて、比較的高磁界にもかかわらず、飛び抜けて大きな値を要求していることがわかる。この傾向は蓄積エネルギーの比較図でも認められる。

超伝導マグネットの技術進歩に大型化路線と高磁界化路線があるとすれば、ITERの2種のマグネットは大型化路線にある。一方、研究用のマグネットは高磁界化路線にあり、高分子蛋白質の分子構造解明のための23テスラのものが現在計画されている。超伝導技術は、基

盤技術的な性格が強く、それぞれの利用分野で開発された材料技術、設計手法、導体製造技術、巻線技術、電磁力支持構造などに関する新しい知見が、いわば共通のバリエーションの中に逐次蓄積されていき、必要な時にいつでも活用できるようになっているとみることができる。こうした中で、核融合分野が大型化路線の、研究分野が高磁界化路線の牽引車の役割を果たしているといえる。

(c) 負イオンビーム技術の進展と波及

「正イオンビーム」技術が産業界に波及して良い結果を生んでいることは前に述べた。その後、中性化効率がこれより優れた「負イオンビーム」の研究が引き続いて進められた結果、長年の夢であった負イオンNBI装置の実用化が日本で実現し、世界の核融合研究開発に大きく貢献している[15]。両者のビーム電流の進展状況をFig. 8に示す。

負イオンは、電気的に中性の原子または分子に、電子が弱い力（電子親和力 $\sim 1\text{eV}$ ）で付着したもので、この付着力は、クーロン力で結びついた電子を取り去った正イオンの電離エネルギー（ $\sim 10\text{eV}$ ）に比べてほぼ1桁小さい。また、中性原子に戻る時に、前者はエネルギー

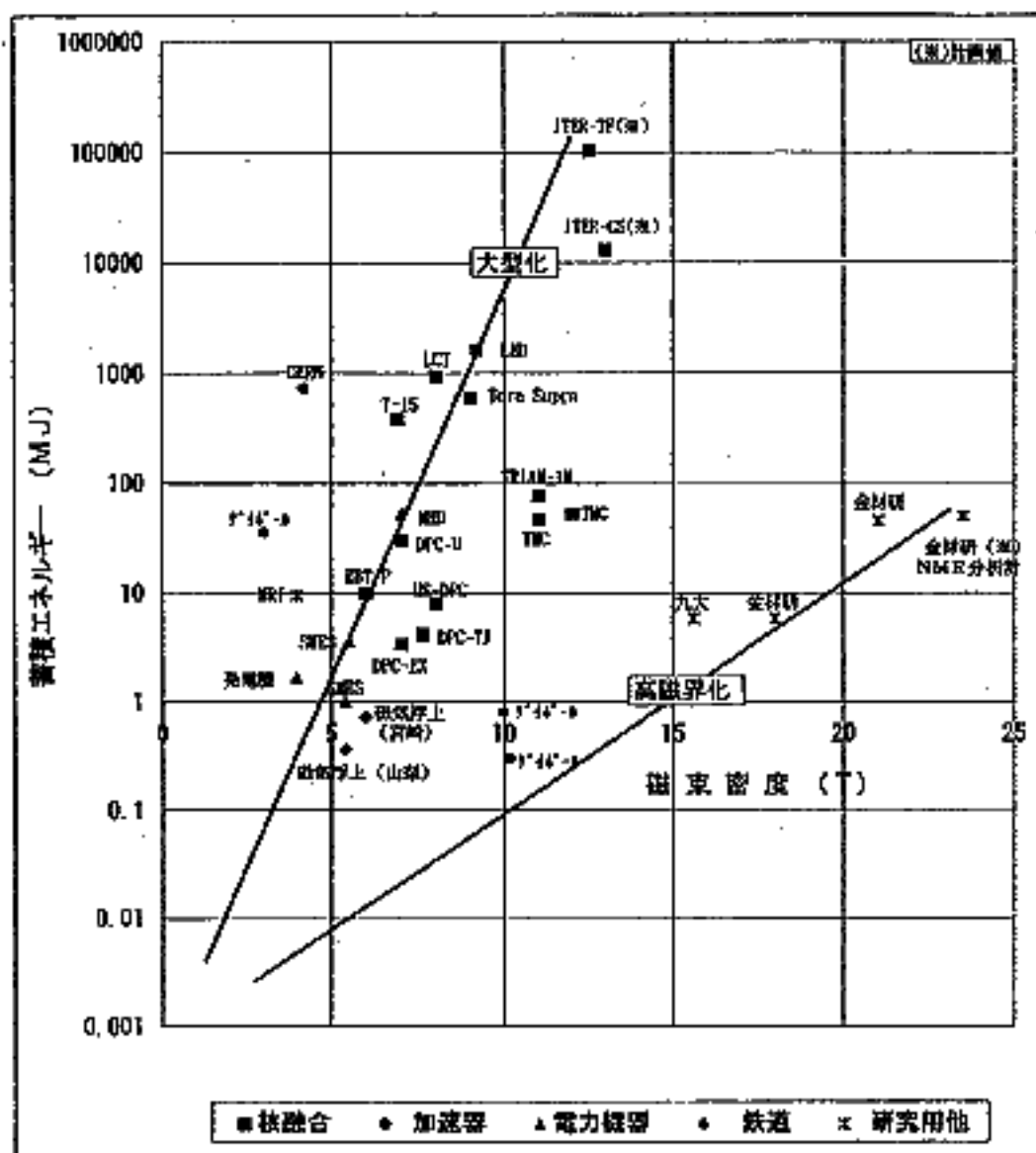


Fig. 7 超伝導マグネットシステムの蓄積エネルギー比較。
超伝導技術は基盤技術の一つで、核融合分野が大型化の、研究分野が高磁界化の牽引役を務めている。

を周囲から吸収（吸熱）するのに対し、後者は放出（発熱）する。これらの特性の違いにより、固体との相互作用における両イオンの挙動に差が出てくる。たとえば正イオン注入時に見られる材料表面の帯電現象が、負イオンを用いることにより軽減できることが最近の研究で明らかになってきている[16]。

アンペアオーダの正イオンビーム技術は、磁性皮膜や液晶分野で実用化されている。しかし、ビームが方向性を持っているため、立体形状物への適用には工夫が必要である。1986年に米国で提唱された三次元イオン注入技術はこれを改善できる可能性のある技術の一つで、最近日本でも開発されはじめた[17]。今後の産業応用の拡大が注目される。一方、負イオンビームの産業応用は、現時点では顕在化していないが、その研究の進展に伴い、今後新たな波及効果を生むことが期待される。

(d) ジャイロトロン

プラズマを加熱したり、プラズマ中に電流を流し続けるための装置に、中性粒子入射加熱装置と並んで「高周波加熱装置」がある。大略 10 MHz から百数十 GHz の電磁波をプラズマに入射して、イオンや電子と共鳴させることによってこれらにエネルギーを付与するもので、特定のエネルギーをもった、特定の位置にある粒子を選択的に加熱できる。10～100 MHz 近辺の電磁波を発振してイオンを加熱するための四極管、イオンと電子の中間の共鳴周波数（1 GHz 前後）を発振するクライストロンに加えて、10～百数十 GHz の電磁波を発振して電子を加熱するジャイロトロンの技術が最近めざましい進歩を遂げている。

ジャイロトロンはミリ波帯の高周波大電力を発振する電子管の一種で、これを使った最初の実験は1960年半ばにソ連で行われたとされ[18]。その開発はまずロシアで始まったが、その後米国や日本でも進められた。日本で

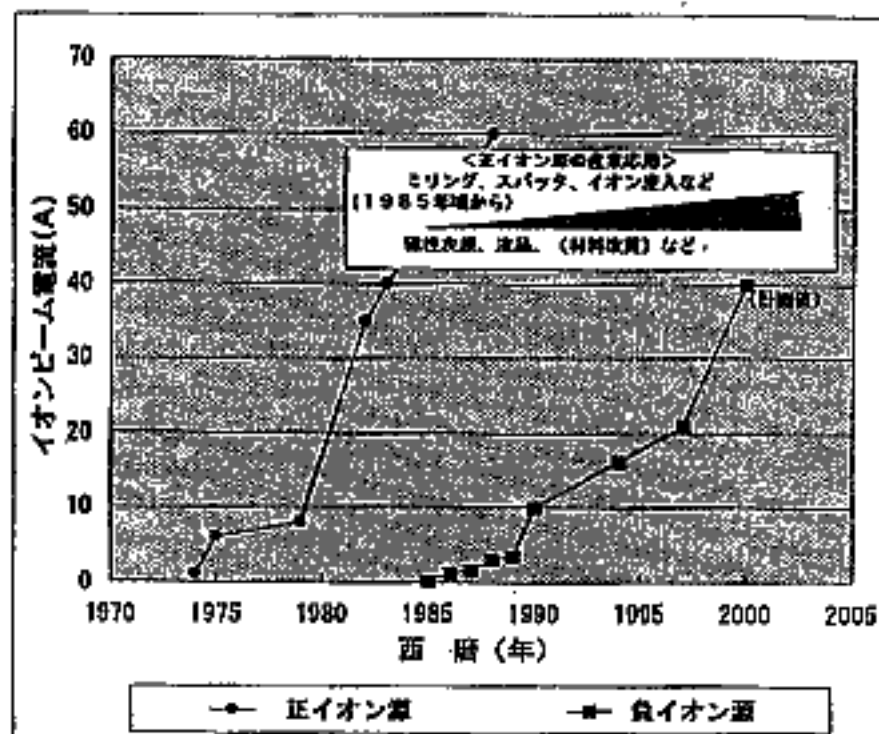


Fig. 8 NBI用イオン源の進歩

正イオンビーム源の産業応用はその後淘汰が進み、経済性などで優れたものが生き残っている。今後、負イオン源の産業応用が期待される。

は70年代後半に最初の商用管が試作されているが、90年代になって日本とEUでの開発が大きく進み、とくに日本でのエネルギー回収技術の進歩による効率改善(30%→50%)と、出力窓の技術進歩は、世界の技術進歩に少なからず貢献し、高周波加熱技術の展望が大きく開けた。Fig. 9に、出力100 kW級以上のジャイロトロンについて、日本と欧米での開発の進展状況を示す。(発振周波数100 GHz未満の発振管には連続定格のものがあるが、パルス幅が10秒を超えるものは、10秒としてプロットした。)現在、日本、ロシア、米国、フランスが開発にしのぎを削っているが、中でも170 GHz-500 kW-6秒および同-450 kW-8秒定格の発振管の開発を終えている日本が、ロシアを抜いて現在トップの座にあるといえる。発振周波数が高くなるほど開発はむずかしくなるが、単に出力エネルギーで見れば、米国が1996年まで110 GHz発振管で常に高いレベルを維持していたことが、本図からわかる。

ジャイロトロンは、純粋に核融合分野で、プラズマを加熱するために開発された。この点、四極管やクライストロンのように、放送や通信用としてすでに実績のあった技術をベースにして、長パルス化・大電力化の改善を経て核融合分野に応用したケースと異なる。ジャイロトロンの産業応用として、セラミックスの焼結技術がある。米国ですでに10年あまり前に60 GHz-200 kWのジャ

イロトロンを用いて、セラミックプロセスのための加熱実験をしたとの報告がある。日本では28 GHz-10 kW級ジャイロトロンを用いたマイクロ波焼結装置が、すでにカタログ製品として販売されている。ロシアでは、大口径金属管にポリエチレン被覆を施す技術が報告されている。これは、金属管にプライマとポリエチレンの薄膜をまずコーティングし、ジャイロトロンからミリ波を照射してプライマを選択的に加熱し、ポリエチレンを金属管に固着するもので、ミリ波技術にして成しうるユニークな方法といえる[19]。MW級出力の用途が直ちに他分野で見いだせるとは考えにくい。高効率化に加えて使いやすさやコストパフォーマンスなどの改善が進めば、産業応用がさらに進むものと期待される。

(a) その他

前述の技術以外に、大型構造物の精密加工・組立技術、高度な遠隔操作技術、低放射化フェライト鋼、バナジウム合金、SiC/SiC複合材料といった炉構造新材料など、数々の魅力ある新技術の開発が計画されており、すでに着手されているものもある。今後、これらに伴う波及効果が大きいと期待される。

(b) 技術開発と技術波及の実りある展開をめざして

核融合動力炉をめざした今後の新技術開発と、これら他分野への応用展開に当たって、どのような点に留意すればよいのであろうか？

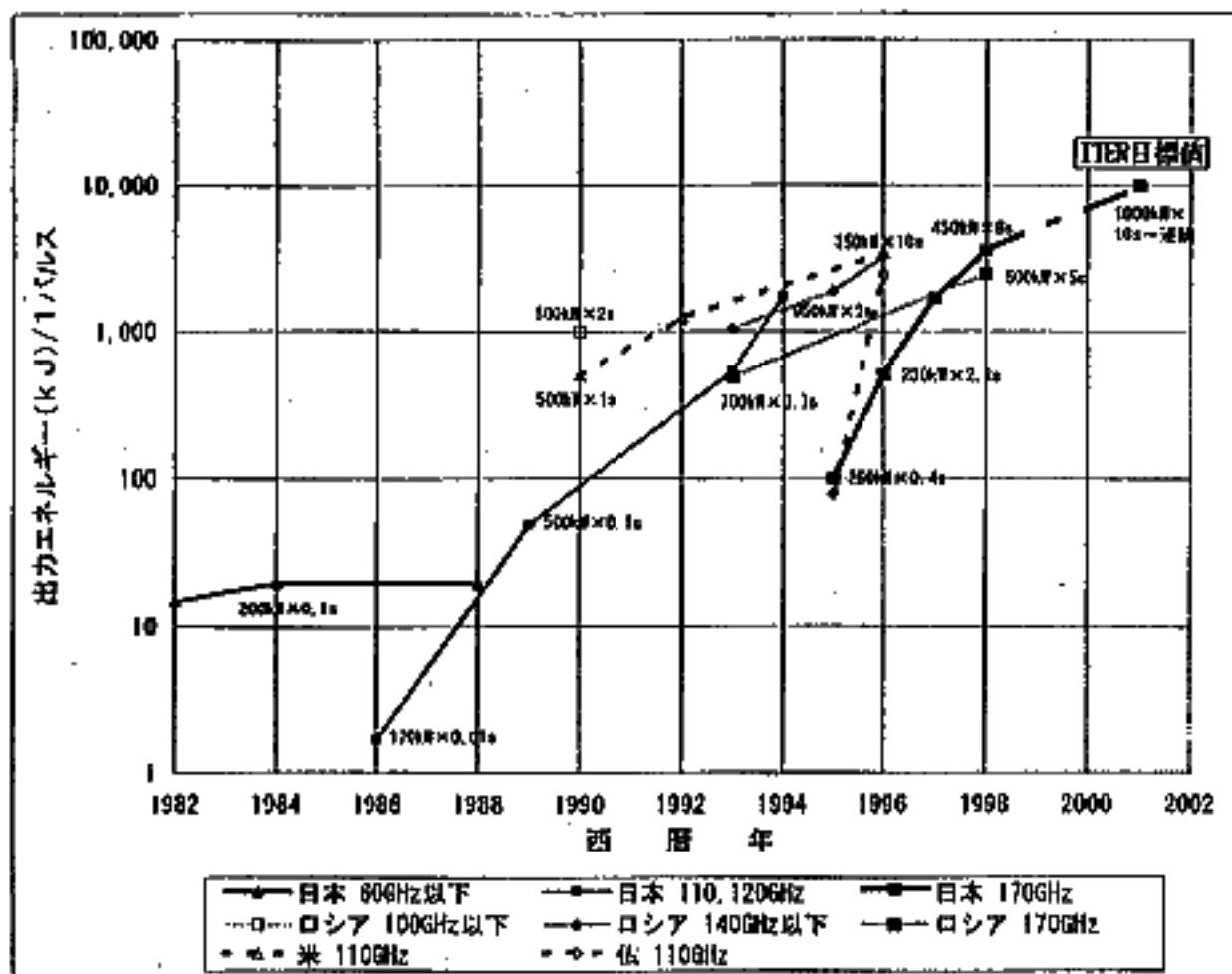


Fig. 9 ジャイロトロン進歩

日本と欧米で開発された 100 kW 級以上の主なジャイロトロンにつき、その出力エネルギーが増大してゆく状況を、国別および発振周波数別に示す。その内のいくつかのものには、出力(kW)と時間定格(s)を併記した。発振周波数、出力、時間定格が年代とともに上昇し続け、その割合は出力エネルギーでみて6~7年で1桁の割合であることがわかる。現在ITER向けの170GHz・1MW・10秒連続定格の発振管の完成を見通せる段階にある。

「技術」には通常複数の解が存在し、それぞれの国や企業はこれらの解から選り出した独自の技術あるいは得意な技術(技術の最適解)を持っている。こうした国や企業が国際協力の一つの装置を建設する場合、技術開発をどのように進めていくかは重要な課題である。

一方、「技術開発」が本来もっている側面の一つとして、技術者自らが手を下して開発したものでないと、実用段階で役立ちにくい、ということがある。事実、核融合分野でも、前人未踏の先端技術開発において、当初予測できなかった難問が次々に出てくるのが常であるが、これらを克服しながら解を見いだしていくことそれ自体が技術開発の重要な部分を占めており、この過程を経ることによって、より良質の生きた技術を手にすることが可能となる。そして物造りの心を吹き込まれた新技術が実用に供され、蓄積された知見が、将来に起こりうる技術の改良を可能にするとともに、優秀な人材が育ってゆく。

「わざわざ自ら手を下さずとも、他国が行った技術開発の成果を導入すればよいではないか。」という主張を

時々耳にする。この考え方は一見効率的で好ましいように思えるが、少なくとも二つの問題ををはらんでいる。その一つは、予期せぬ難問を克服して解を得ていく過程を経験できないため、たとえばその後の補修や改良もままならないということが将来起こりうる。他の一つは、このようにして導入された技術は、自国と導入先の技術の質(製作ノウハウ、材料資源、検査基準他で形作られる技術の総体)が通常異なっているため、そのままの形ではまず役立たないことが多い、ということである。導入技術を真に役立てるには、自国の技術の質に合うような改善や、R&Dのやり直しを要する場合が出てくる。将来のエネルギー源となる装置を、責任を持って提供する立場にある産業界にとって、「自ら手を下して技術を開発する」ことは、忘れてはならない要件である。核融合開発を国際協力で進めることも大切であるが、それには自ら限界があることをよく認識し、国際協力による開発と、わが国が主体的に進める自主開発の調和を保って進めることへの絶えざる配慮が望まれる。

このようにして、自ら手を下して開発した技術であれば、核融合技術の他分野への応用展開は比較的スムーズに進み、より充実した成果を手にすることができるであろう。技術開発の成果のみを海外から導入した技術では、他分野への応用展開がなかなか進みにくいのが実状である。

開発された技術の飛躍が大きければ大きいほど、そこから得られる波及効果も大きいといえる。ただ、核融合の場合、そのレベルが突出していて他分野への応用展開にすぐに結びつかないものが少なくない。このことから、新しく生まれた技術の新規性や進歩の度合いなどを、わかりやすい形でかつタイムリーに、一般社会に説明してゆくことが、他分野に波及効果をよりスムーズに誘起する上のみならず、核融合研究開発に対する社会の理解やなじみを増す上で大切なことと考えられる。説明にあたっては、既存技術と比べてどこが優れているのか、他分野での技術進歩の速度と比較してどうなのかといった、聴く側に立ったいろいろな工夫が必要であろう。また、新しく生まれた波及効果をポジティブに評価するとともに、一般社会にわかりやすく、繰り返し伝えてゆくことは、核融合研究開発の社会的受容性を高めるための重要な要素の一つである。

最後に、本項の執筆にあたり、多くの方々にご協力いただいた、京都大学エネルギー理工学研究所長の井上信幸教授には、急速に進歩する技術のありかについてご教示いただいた。また、日本原子力研究所那珂研究所の太田 充所長、辻 博史室長、奥村義和室長、今井 剛室長、秋場真人氏、石田良一氏、核融合科学研究所の金子修教授、東芝原子力事業部の岡本 正技術顧問、三菱電機核エネルギー開発部の塚本忠則主管技師長、日立製作所日立研究所の相原勝蔵主任研究員、同電力電機開発本部の田中政信氏には、それぞれのご専門分野での貴重なデータを提供いただくとともに、ご教示とご議論を賜った。紙面を借りて心からお礼を申し上げます。

(森野信幸)

10.3 学術的な波及効果

ここでは核融合研究の学術的な波及効果を、「核融合研究以外の学術分野への研究の応用・展開および学術発信・学術交流」と拡大解釈し、以下の3つに大別し、その代表的な例を挙げてみた。

(1) 核融合反応の応用

- ・放射性廃棄物の消滅処理
- ・放射性同位元素の製造
- ・核融合推進ロケット

(2) プラズマの学術的理解とその応用

- ・プラズマプロセッシングへの応用
- ・熱プラズマによる廃棄物処理
- ・宇宙や天体プラズマの実験室規模でのシミュレーション実験
- ・非中性プラズマ、多価イオン、超冷中性子などの極限プラズマ閉じ込め

(3) 学術発信・交流

- ・非線形非平衡系の物理
- ・複雑性の科学
- ・宇宙・天体プラズマ
- ・数値科学（スペクトル解析、Curlの数値）
- ・大規模シミュレーションとシミュレーション技法
- ・先端技術や国際交流

まず(1)の核融合反応の利用とは、DT、DD、 D^3He 等の核融合反応により発生するエネルギー・中性子等を発電以外の目的に活用することである。核融合炉の特徴は、核分裂炉と比較した場合、中性子エネルギーが14 MeVと高い、単位出力あたりの中性子発生量が約4倍大きい、連鎖反応維持のための中性子は不要などがあげられる。また核融合反応に供する高温プラズマや放射光をエネルギー源として積極的に活用できる可能性もある。核融合反応に供するプラズマおよび中性子の利用として、いわゆる汽力発電以外の活用分野と、その特徴をTable 6にまとめてみた。

核分裂反応と比べて、核融合反応では多量の高エネルギー中性子を発生するので、核分裂炉で発生した核分裂生成物・超ウラン元素の消滅処理として活用する可能性が指摘されており、古くから研究が進められている。またコバルト60やオスミウムなどの放射性同位元素の製

Table 6 核融合反応の特性と活用分野

核融合反応 の特性		汽力発電以外						
		汽 力 発 電	放射 性 廃 棄 物 消 滅 処 理	放射 性 同 位 元 素 の 生 産	核 燃 料 の 生 産 バ イ ン ジ ン テ ン シ オ ン	化 学 燃 料 合 成	核 融 合 に お け る 直 接 発 電	材 料 研 究 開 発
中 性 子	14MeV中性子エネルギー	●	●	●	●			●
	単位出力あたりの中性子数 大		●	●	●			
	中性子連鎖反応が起らない		●	●	●			
プラズマ	ブランケット熱源					●		●
	プラズマ粒子						●	●
	放射光						●	

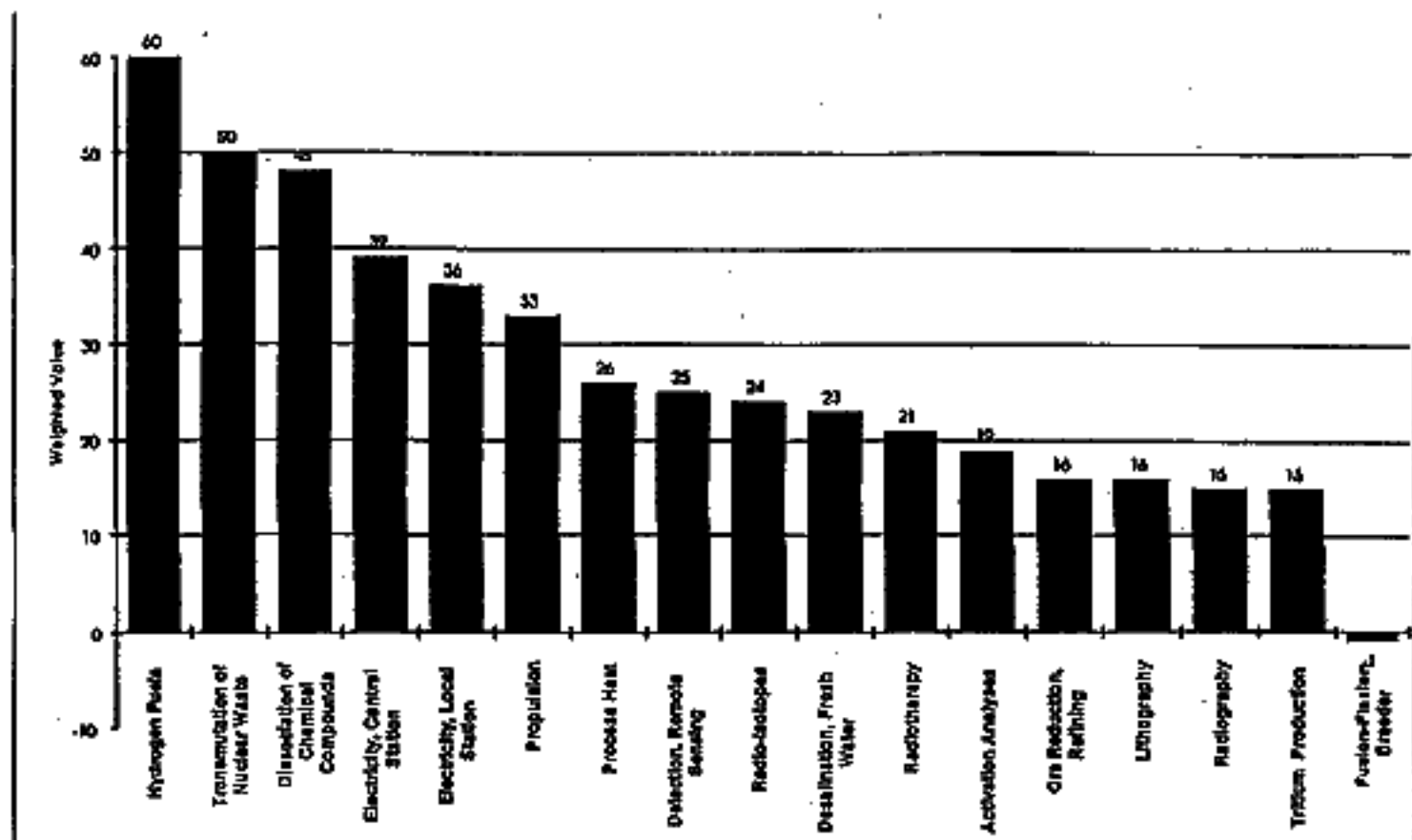


Fig. 10 米国 ARIES チームによる核融合プラズマの利用に関する調査および評価

造などの可能性も調べられている。これらの項目に関しては文献[20]に詳しくまとめられている。

火星探査や、さらなる遠方惑星への探査ロケットを設計するにあたり、どれだけの荷物（ペイロード）が運べるかのペイロード比と、周期的に増減する宇宙の放射線を避けるべく飛行時間を短縮することが重要な要素であると言われている。この観点から、有人惑星間飛行として、従来の化学ロケットでは推進力が不十分であり、より推進力の大きい核融合ロケットのような高性能ロケットの開発が必須である。まだ概念設計の段階ではあるが、核融合炉開発で取り上げられたトロイダル磁場閉じ込め方式・レーザー核融合方式・タンデムミラー方式・反転磁場方式・ダイポール磁場方式などが検討されている。なおこれらの設計に関しては、文献[21]にまとめられている。

地下深くの石油探査や空港での手荷物検査などへの活用として、小型中性子源が求められている。放射性物質の中性子源と比較して、核融合反応を利用した中性子源は、必要に応じて中性子を発生・制御できるという利点がある。このような目的の小型中性子源は、核融合がに比較して何桁も小さい出力でよいので、慣性静電場閉じ込め方式を中心として、近年研究が進められてい

る[22]。

なお米国 ARIES グループでは、核融合エネルギーの汽力発電以外の潜在的可能性を調査・評価している[23]。Fig. 10 は、核融合エネルギーのいろいろな活用に対して評価した結果であり、水素製造や放射性廃棄物処理、化学物質の分解などが高く評価されているのがわかる。

次に(2)のプラズマの学術的理解とその応用とは、放電現象の一分野でしか過ぎなかったプラズマ研究が、ここ数十年における核融合研究の推進により、プラズマの生成・制御・加熱そしてさらにはプラズマ計測の分野において格段に進歩してきており、この学術的発展およびその技術進歩を核融合プラズマ以外の目的で活用している分野である。プラズマの特性を解明しつつ、それを積極的に活用している分野として、核融合炉開発以外の分野として、宇宙・天体研究やプラズマプロセッシングがあげられる。Fig. 11 は、これら3つの分野の交流を図式化したものであり、その代表的な学術交流の例を記してある。

太陽観測衛星「ようこう」による太陽のX線写真は、まさに高温プラズマのダイナミックスを見事に捕らえていた。また超新星爆発やスターバーストなどの研究でも、

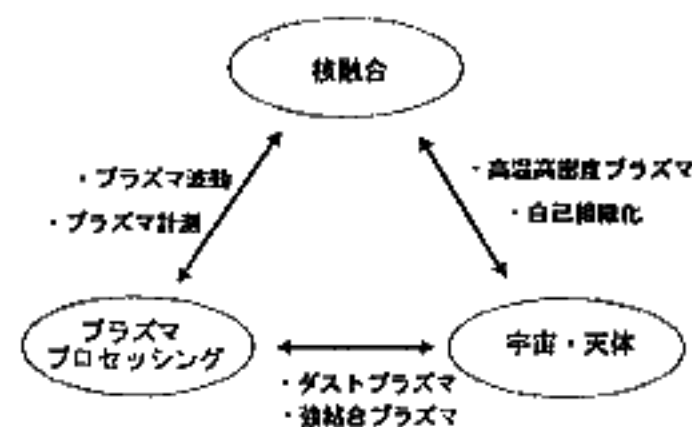


Fig. 11 核融合、宇宙・天体、プラズマプロセッシングにおける学術交流の例

核融合プラズマ研究との関連が盛んに議論されている。宇宙・天体プラズマは、その規模や時間スケールにおいて我々の手の届かない広範な領域に及んでいるが、磁気レイノルズ数などの物理諸量に関しては、核融合プラズマと共通するパラメータ領域にある場合が多い。したがって核融合プラズマ研究は、宇宙・天体プラズマの研究対象と物理的に同等なプラズマを実験室規模で再現できる可能性がある。このような視点に立った研究交流や共同研究が近年盛んに推進されている。

その代表的な例として、太陽フレアとピンチプラズマにおける磁気再結合研究があげられる。ここではまさに、プラズマの自己組織化とそれに伴う様々な物理現象が共通して観測されており、太陽規模の物理現象が実験室規模で再現されているというよい。近年この分野は、非線形非平衡な開放系での物理として盛んに学術交流がなされている[24]。また星などの進化で見られる高温高密度の流体・輻射現象を、レーザー核融合実験設備で生成可能な高温高密度プラズマをもちいて模擬してやろうという、実験室宇宙物理研究なども提案されている[25]。

一方、ドライプロセスが主流である近年の半導体産業では、プラズマ制御技術がまさにその根幹をなしており、核融合プラズマ研究で培われてきたプラズマシース理論、プラズマ中の波動伝播特性、プラズマ計測などの知見がふんだんに応用されている。核融合プラズマとプラズマプロセッシングとの交流に関しては、本誌にも多くの解説・特集記事が掲載されている[26]。とくにECH・ヘリコン波・表面波などの各種プラズマ中の波動がプラズマプロセッシングの分野で大いに活用されている。またフロン等の産業廃棄物の処理にもプラズマが活用されており、より高密度の熱プラズマでの各種化学物質の分解などを含めて、プラズマの産業応用技術はますます盛んになると予想される。このように、プラズマ応用技術

は、まさに21世紀の産業基盤として大変重要な役割を果たすことが期待されている。

プラズマプロセッシングと宇宙・天体の分野でも共通したテーマがある。その代表的なものとしてダストプラズマがあげられよう[27]。プラズマプロセッシングでは、ダストの除去・制御が重要な課題であり、その振る舞いが実験室規模で研究されている。またダストプラズマを利用して、クーロン結晶やフラーレン生成などの研究も行われている。一方宇宙でも、ダストが星間物質として多量に浮遊しており、銀河内の星の光は、主としてこのダストによって散乱・吸収されている。土星のリングは、まさにこのダストプラズマで形成されている。

なおこれ以外にも、プラズマの特徴である、電磁場を介しての粒子多体系における集団現象に関連した学術分野として、プラズマ加速場による新粒子加速[28]の研究や、非中性プラズマ、多価イオン、超冷中性子の磁場閉じ込め研究に代表される、極限プラズマの閉じ込め研究[29]があげられよう。たとえばウランを数時間閉じ込め、92価まで電離させることに成功しており、量子電磁力学(QED)効果の検証なども期待されている[30]。

最後に(3)の学術発信・交流とは、核融合研究によって培われた学術・技術などが、他分野へ学術としていかに発信してきたか、またどのように交流してきたかを指すものである。プラズマは、代表的な非線形非平衡な媒体であり、まさに現代科学の最先端知識・技法をもってしても、その挙動を解明することは大変困難である。プラズマの自己組織化、ダイナモ効果、カオス現象、レイリー・テイラー不安定性などは、核融合プラズマ研究のいろいろな側面で観測されているが、これらの現象は地球磁場形成・太陽フレア・超新星爆発などの宇宙・天体プラズマでも観測され、盛んに研究されている共通のテーマである。なお核融合研究の利点は、これらの現象を実験室規模で発生させることができるという点である。したがって、より精密な計測や能動的な実験が可能であり、様々な現象に対する物理機構解明には大変有利であるといえる。

核融合プラズマ研究から派生した学術および応用研究として、ソリトン(孤立波)があげられよう。19世紀後半に、水面を伝わる波の研究から発見されたソリトンは、非線形媒体としてのプラズマ中を伝播する波の特性研究により大きく進展した。そして現在では、光ファイバ中を伝播する光ソリトンへの応用研究として発展し、次世代の超高速通信手段として通信分野において大いに期待されている[31]。

高温プラズマの安定な保持を目的として、プラズマの安定性解析は格段に進歩した。そこではスペクトル解析理論、Curlの数値などに代表される数値科学への貢献が挙げられよう。また、核融合プラズマ実験における複雑な条件・形状を、より正確に取り扱うべく大規模シミュレーションが精力的に推し進められてきた。その結果、流体コードにおけるスペクトル汚染除去法や粒子コードにおけるPIC法をはじめとした、いろいろなシミュレーション技法が開拓され、これらの手法はさまざまな分野でも大いに役立っている。

現代の核融合実験装置および将来の核融合炉は、先端技術の塊であると言っても過言ではなく、これらの技術およびその成果が核融合以外の分野にいかにも幅広く応用され、波及してきたかは10.2節で見たとおりである。とくに最近、国際熱核融合実験炉ITERの設計・建設へ向けての数多くのR&Dが精力的に推進されてきている。なおこのような研究・技術成果とともに、ここでもう一点強調しておくべき点は、科学技術における日本の国際協力・国際交流の試金石として、ITERに代表される核融合研究が取り上げられている、ということである。ITERは日本が米・欧・ロシアと対等な立場で大規模な国際協力をしている最初の例であり、核融合研究は日本の国際貢献という視点からも、大変重要な役割を担っている。

(小川雄一)

参考文献

- [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] 岡 芳明他：日本原子力学会誌 39, 135 (1997)
- [3] U.S. DOE, *The fusion connection: Contributions to Industry, Defense, and Basic Science Resulting from Scientific Advances Made in the Magnetic Fusion Energy Program* (1985).
- [4] U.S. DOE, *The U.S. Fusion Program as a Source of Technology Transfer* (1993).
- [5] U.S. DOE, *Technology Spin-offs from the Magnetic Fusion Energy Program* (1982).
- [6] JET Joint Undertaking, *JET and industry* (1987).
- [7] Commission of the European Communities: *Qualitative analysis of the benefits to European high technology industry arising from fusion contracts*, EUR-FU BRU/XII.257/87 (1988).
- [8] T. Umezaki, V.F. Demichev, R. Davidson and J.P. Rager, *Nucl. Fusion* 30, 1935, 30 Years of "Nuclear Fusion", IAEA Anniversary issue (1990).
- [9] N. Morino, *Atoms in Japan*, 31, 14 (1987).
- [10] 森野信幸：核融合技術の産業への応用，プラズマ・核融合学会：第1回専門講習会「プラズマ生成技術とその応用」テキスト (1989)。
- [11] 森野信幸：プラズマ・核融合学会誌 70, 634 (1994)。
- [12] 核融合関連技術調査専門委員会：核融合研究開発に先導される新技術とその波及効果，電気学会技術報告 (II部) 第352号 (1990)。
- [13] 河辺隆也：プラズマ・核融合学会誌 71, 338 (1995)。
- [14] 森野信幸：アルゼンチンへのハイテク支援①②，原子力産業新聞，1995年3月23日，30日付，日本原子力産業会議。
- [15] 小原祥祐：プラズマ・核融合学会誌 72, 393 (1996)。
- [16] 石川順三：第7回粒子線の先端の応用技術に関するシンポジウム (BEAMS1996) 予稿集，37 (1996)。
- [17] 鈴木泰雄他：電気学会誌 118, 147 (1998)。
- [18] 峰 道基：プラズマ・核融合学会誌 73, 275 (1997)。
- [19] 今井 剛，岡本 正：ミリ波帯発振管ジャイロトロンの開発と産業応用，原子力と先端技術 [II]，日本原子力産業会議 原子力システム研究懇話会，(1995)。
- [20] 日本原子力産業会議：「核融合反応の多角的利用を目指して」，昭和63年3月。
- [21] 大竹正明：プラズマ・核融合学会誌 73, 1307 (1997)。
- [22] 大西正規：プラズマ・核融合学会誌 73, 1080 (1997)。
- [23] L.M. Waganer and the ARIFS Team, *Assessing a new direction for fusion*, 6th IAEA TCM on Fusion Power Plant Design, 1998 March, Culham, U.K.
- [24] 佐藤哲也：日本物理学会誌 50, 340 (1995)；吉田善章：日本物理学会誌 48, 73 (1993)。
- [25] 高部英明，野本憲一：日本物理学会誌 53, 84 (1998)。
- [26] 鈴木正昭他：プラズマ・核融合学会誌 73, 923 (1997)；吉田善章：プラズマ・核融合学会誌 73, 757 (1997)；菅井秀郎他：プラズマ・核融合学会誌 72, 621 (1996)；原 民夫他：プラズマ・核融合学会誌 71, 682 (1995)。
- [27] 南部光宏：日本物理学会誌 52, 409 (1997)；渡辺征夫他：プラズマ・核融合学会誌 73, 1220 (1997)；浜口智志：日本物理学会誌 50, 527 (1995)。
- [28] 小方 厚：日本物理学会誌 50, 736 (1995)；小方厚：プラズマ・核融合学会誌 70, 6 (1994)。
- [29] 毛利明博，道下敏則：日本物理学会誌 52, 585 (1997)。
- [30] 中村信行，大谷俊介：日本物理学会誌 52, 919 (1997)。
- [31] 長谷川晃：日本物理学会誌 51, 806 (1996)。

「核融合エネルギー科学研究計画の展開」から抜粋（仮約）
 （米国エネルギー省科学局核融合エネルギー研究諮問委員会）

核融合エネルギー科学研究計画の展開（要約）

1999年11月

作成：

米国エネルギー省科学局
 核融合エネルギー研究諮問委員会

核融合エネルギー研究諮問委員会メンバー

Charles C. Baker*, カリフォルニア大学、サンディエゴ校

Stephen O. Dean、核融合パワー協会

N. Fisch†、プリンストン・プラズマ物理学研究所（PPPL）

Jeffery P. Freidberg*, マサチューセッツ工科大学

Richard D. Hazeltine*, テキサス大学

G. Kulcinski、ウィスコンシン大学

John D. Lindl*, ローレンス・リバモア国立研究所（LLNL）

Gerald A. Navratil*, コロンビア大学

Cynthia K. Phillips*, プリンストン・プラズマ物理学研究所

S. C. Prager, テキサス大学

D. Rej, ロスアラモス国立研究所

John Sheffield*, オークリッジ国立研究所（ORNL）、

コーディネータ

J. Soures, ロチェスター大学

R. Stambaugh, ジェネラル・アトミックス社

R. D. Benson, ORNL サポート

J. Perkins, LLNL サポート

J. A. Schmidt, PPPL サポート

N. A. Uckan, ORNL サポート

* FESAC 会員

† FESAC 元会員

序文	iii
概要	vi
1. 緒言	1-1
1.1 核融合科学	1-1
1.2 核融合エネルギー研究の戦略的役割	1-2
1.3 核融合エネルギーへの2つの道筋	1-2
1.4 米国エネルギー省と世界の核融合計画	1-4
1.5 将来計画	1-4
2. 核融合エネルギー科学技術	2-1
2.1 はじめに	2-1
2.1.1 核融合燃料サイクル	2-1
2.1.2 核融合エネルギー生産の環境面、安全面	2-2
2.1.3 核融合エネルギー研究の進捗状況	2-3
2.2 磁場核融合エネルギー	2-4
2.2.1 はじめに	2-4
2.2.2 磁場閉じ込めの物理学	2-5
2.2.3 磁場核融合エネルギーに至る道筋	2-11
2.2.4 磁場核融合エネルギーの今後の可能性	2-21
2.3 慣性核融合による核融合エネルギー	2-27
2.3.1 はじめに	2-27
2.3.2 ICF ターゲット物理	2-29
2.3.3 レーザーとイオンビームの慣性核融合エネルギー開発アプローチ	2-39
2.3.4 慣性核融合エネルギードライバ	2-42
2.3.5 慣性核融合エネルギーターゲット概念と設計	2-46
2.4 技術的展開	2-49
2.4.1 概要と最近の進歩	2-49
2.4.2 技術ポートフォリオ	2-51
2.4.3 慣性核融合エネルギーチャンバーとターゲット技術研究開発	2-55
3. 核融合研究の科学研究的状況	3-1
3.1 はじめに	3-1
3.1.1 プラズマ科学	3-1
3.1.2 概念ツール	3-1
3.1.3 核融合科学の進歩	3-2
3.2 特に注目を集めているプラズマ科学の分野	3-3
3.2.1 ハミルトン力学	3-3
3.2.2 長平均自由行程プラズマ	3-3
3.2.3 乱流	3-4
3.2.4 ダイナモと緩和	3-4

3.2.5	磁気再結合	3-5
3.2.6	波伝播	3-5
3.2.7	非中性プラズマ	3-6
3.2.8	静電気トラップ	3-6
3.2.9	原子物理	3-7
3.2.10	ICE/IFE (慣性核融合エネルギー) におけるオパシティ	3-7
3.2.11	プラズマ診断	3-8
3.2.12	プラズマシステムのコンピュータモデリング	3-8
3.2.13	高密度物質	3-9
3.2.14	高エネルギー密度実験室天体物理学	3-10
3.3	工学科学で注目を浴びている分野	3-10
3.3.1	大量材料科学	3-10
3.3.2	表面材料科学と原子物理	3-10
3.3.3	流体/真空インターフェースでの伝熱	3-11
3.3.4	アブレーション、放射気体力学、圧縮	3-11
3.3.5	物質中の中性子伝播と光子伝播	3-12
3.3.6	ベブルベッド熱力学	3-12
4.	短期的用途	4-1
4.1	はじめに	4-1
4.2	展望と可能性	4-1
4.2.1	マイクロエレクトロニクスとフラットパネルディスプレイ	4-1
4.2.2	材料と製造	4-3
4.2.3	環境保全用途	4-3
4.2.4	バイオ技術と食物安全への応用	4-5
4.2.5	プラズマ推進	4-5

3.1 はじめに

核融合エネルギーの探求には、優れた科学研究が必要である。科学の進歩と深い科学的解明が得られなければこの探求は失敗する。同時に核融合プログラムは、優れた科学研究を生み出す上で並外れた成果を残している。流体力学、天体物理、非線型力学といった分野に、不可欠な洞察や革新的概念をもたらした。核融合研究が産み出した科学研究の進歩のほとんどは、あの複雑極まりない物質状態、プラズマの挙動についての発見として始まった。

3.1.1 プラズマ科学

プラズマは、正の電荷をもった核種と負の電荷をもった電子という2つの帯電原子構成要素が独立して動き回れる気体または液体である。原子はイオン化されている。(プラズマという用語は、1928年に、グロー放電に見られる電離した状態を記述するために Langmuir が使ったのが初めてである)。こうした粒子間のクーロン相互作用が強力で長い範囲に及んでいるため、プラズマは、並外れた力と複雑さを備えた動きを呈した。正味の帯電密度がほぼ消失する最も一般的な“準中性の”ケースであっても、局所的な帯電不均衡や局所電流が、多様極まりない電磁波、乱流運動、非線形コヒーレント・プロセスなど、流体の集団的移動を引き起こす。

プラズマは、星間空間であるとともに星の材料でもある。プラズマは宇宙の媒質である。プラズマは、太陽風と磁気圏の形で地球の局所的環境を提供している。これはある意味で、飼いならされていない自然の状態である。冷たい惑星の表面のような例外的な環境ではじめて、他の形態の物質が支配的になる。しかも、地球上のプラズマは、見つけることが難しい。プラズマは、とりわけ、雷、蛍光、さまざまな実験室実験、多岐にわたって増加する工業工程などで見られる。こうしたことから、グロー放電が電子チップ産業の主流となった。核融合発電に向けた動きが、プラズマ解明に多大の貢献をするとともに、プラズマの生成、加熱、閉じ込めを行なう数多くの装置を産み出した。

3.1.2 概念ツール

プラズマ物理が提起する中心的な研究課題は、ロングレンジの相互作用、集合的プロセス、平衡状態からの強力な逸脱が関与する多体システムの記述法を見つけることである。この課題は、衝突のない (Laudau) ダンピングの概念、ソリトンの発見、カオス研究などの一連の著しい研究の進歩をシミュレートしてきた。この課題は、あまりに深遠で、困難なため、これが要因となって実現したコンピュータの計算能力の飛躍的な向上をもってしても、長年にわたり最も高度な難題のままに留まっている。この課題を解決するため、これまでさまざまなアプローチが試みられている。

洞察を得るための最も簡単な方法は、個々の帯電粒子の動きを、所定の磁場と電場で追跡することである。不均一な磁場では、帯電粒子の軌道は、磁力線を中心とする基本的なヘリカル運動だけでなく、磁界の勾配と曲率から生じるガイディングセンターのドリフトもその構成要素となっている。

適切なバージョンのボルツマン衝突オペレータを使った力学理論は、常に追跡可能というわけではないが、全体としてより信頼の置けるアプローチを提供してくれる。安定した（非乱流）プラズマの場合、力学的アプローチがプラズマ版の衝突伝播理論になり、粒子と熱流速の貴重な数式が得られている。プラズマが磁化されると、衝突平均自由行程が非常に長い場合でも、磁場に対して垂直な伝播プロセスが起こる。

プラズマ力学の流体記述が意味を持つのは、特定の状況、特にプラズマの Alfvén 波の速度に匹敵する高速で大量のプラズマ運動を引き起こす巨視的不安定性を記述する場合においてである。磁化されたプラズマの十分高速な運動が、相対的に単純な流体理論によって正確に特性評価できる。これは、エネルギー散逸効果を含んでおらず、磁気流体力学または MHD と呼ばれる。

空間規模が小さい場合によく見られる速度の違いその他の不安定性は、より複雑な記述が必要になる。これは基本的にはその時間規模がガイディング・センター・ドリフト、衝突、その他 MHD が省略しているプロセスの時間規模に匹敵するからである。ドリフト波は、流体勾配によって不安定化される、特徴的な例である。温度勾配によって駆動されるドリフト波不安定性は、多くのトカマク条件で輸送を支配すると考えられる。こうした現象は、動力学理論や流体力学混成記述を使って研究される。

3.1.3 核融合科学の進歩

こうしたアプローチを使用して達成された成果は、この数 10 年で加速してきた。実験、理論、計算の組み合わせが、説明力と予測力の両方を持つ科学的解明につながってきた。現在十分解明されているプラズマ現象に、電離圏から出るホイッスラー波、磁化プラズマにおける Alfvén 波伝搬、新星の不安定性、磁化プラズマにおける微視的不安定性などがある。

プラズマ挙動の最も困難な領域の一つである乱流輸送にさえこのような幅広い一致が見られる。Maxwell とニュートンの法則にもとづく新しいシミュレーションは、トカマク閉じ込め結果と、驚くほど広い条件に渡って、少なくとも定性的な精度で一致した。この乱流を制御する上での速度磁気シアの有効性は、このデータにも同様に反映されている。したがって、プラズマ乱流とその影響の予測的解明に進歩があった。そして最近の閉じ込め物理に関し進歩したテーマでもある、この成功のカギを握るものは、分析理論、コンピュータによる計算、そして実験物理の緊密な連携である。

こうした連携が磁場核融合物理のもう一つの進歩のカギを握っていると現在では認識されている。境界での粒子と熱交換を制御するため、ダイバーターを使用しなければならないことは明らかである。ダイバータープレートと接触する相対的に冷たいプラズマに関係した電磁放射、原子プロセス、伝播、超音速フローなどのさまざまな問題が提起されている。ダイバーター研究は、低温プラズマの物理のよりよい理解をもたらす（ダイバーター配位によっては、プラズマ温度が数 eV しかない領域を持っているものもある）。一つの成果は、工業プラズマの物理との接触の増加である。

事実、関連研究領域との幅広く実り多い接触がますます磁場核融合研究の特徴となってきた。例えば最近提案された閉じ込め方式は、天体物理プラズマ現象がヒントになっている。同様に、プラズマ乱流解明の前進は、組織された臨界や流体力学などの分野での研究に負うところが大きい。最も重要なことは、物理や科学の他の分野との接触を促進することが、継続的な磁気閉じ込め研究の進歩にと

って不可欠であるという認識が広がっていることが重要である。

3.2 特に注目を集めているプラズマ科学の分野

3.2.1 ハミルトン力学

ハミルトン力学は、通常の微分方程式 $dq/dt = \partial H(p,q,t)/\partial p$ および $dp/dt = -\partial H/\partial q$ によって定義される。変数は、標準モーメント(p)、座標(q)、時間、およびハミルトニアン(H)である。連続体ハミルトン力学は、類似した一まとまりの方程式であるが、 p と q は、変数から、位置、モーメント、時間の関数に一般化された。磁場核融合プログラムは、カオス力学の閾値の決定、カオスを取り除く手法、非ハミルトン力学法、電磁線トレーシングなど、多くの幅広く認められた開発を実現してきた。トロイダルプラズマのために開発されたこうした方法の中には、天体物理で現在使用されているものもある。

離散ハミルトン力学には、一まとまりのコイルが作り出す磁力線の軌跡のマッピング、磁場における帯電粒子の軌跡の計算、電磁波の伝搬の追跡、モンテカルロ法を使ったプラズマ輸送特性のシミュレーションなど、複雑な磁場形状での応用分野が数多くある。ハミルトン力学の応用は、こうした各分野で急速に進歩している。事実、プラズマ物理研究でのハミルトン力学の応用は、隅々にまで行き渡っており、計算方法が学校で習う物理の方法論を決定しているのと同じくらいハミルトン力学が思考方法を決定している。

3.2.2 長平均自由行程プラズマ

衝突によって支配されるプラズマ（または中性ガス）の中では、粒子の運動は、温度や密度の変化の規模に比べて短い空間的規模でランダム化される。その結果、質量と熱のプラズマフローが局所圧力や温度勾配に対して線形的に相関し、スピッツァー、チャップマン・コウリング、ブラジンスキーなどの方程式に代表される流体の記述が可能である。流体方程式は、動力学方程式の 6 次元位相空間ではなく、3 次元座標空間内にあるという重要な利点がある。他方、衝突性が小さい場合、または勾配が（材料表面に近づくにつれて）非常に急になる場合、流体方程式を閉じることが可能でないことは明らかであり、これまで動力学理論に立ちかえることが必要であった。しかし、長平均自由行程研究の目標は多くの場合、流体記述の簡素さをいくぶんか残すことを可能にする簡略な記述を見つけることにある。

長い平均自由行程の物理は、プラズマ安定性、レーザープラズマ相互作用、粒子エッジ物理など、勾配が急になる多くの現象に影響を与える。核融合科学におけるこの物理課題優先的目標は、閉じ込めプラズマのエッジ領域における力学の解明、慣性核融合研究で使用するレーザー照射プラズマにおける高エネルギー電子による熱輸送の特徴分析、磁気閉じ込めプラズマの内部領域における安定性、低衝突性の緩和、乱流の効率的な記述の 3 つである。これらの場合、平均自由行程は平行結合長をはるかに越える。長平均自由行程の研究は、希薄化ガス力学、天体物理、短パルスレーザー物理、宇宙物理（地球の磁気圏の主たる領域における平均自由行程は、地球から木星までの距離とほぼ同じである）など、他の分野での研究に重大な影響を及ぼす粒子移動や流体閉鎖という基本的な問題に関与している。

3.2.3 乱流

プラズマは、乱流現象のほぼすべての発現に関し多彩なプラットフォームを提供している。空間と時間に関する確率論的挙動は、プラズマ物理の非線形性の帰結である。確率論的挙動は、独自の乱流駆動輸送（図 3.1 参照）、変則混合、その他天体物理、地球物理、核融合エネルギーシステムにおいて解明の進んでいない重要な数多くの特徴を生じさせる。乱流プラズマでは、関係ある温度と密度の全範囲にわたって調べることができる。乱流プラズマの研究は、電磁場に対する感受性を利用したプラズマ診断と、気体や液体の流れの標準的診断を活用することができる。したがって、プラズマにおける乱流の研究を通じて、通常の流体力学では得られないような新しい乱流物理の発見と進展の機会が得られる。

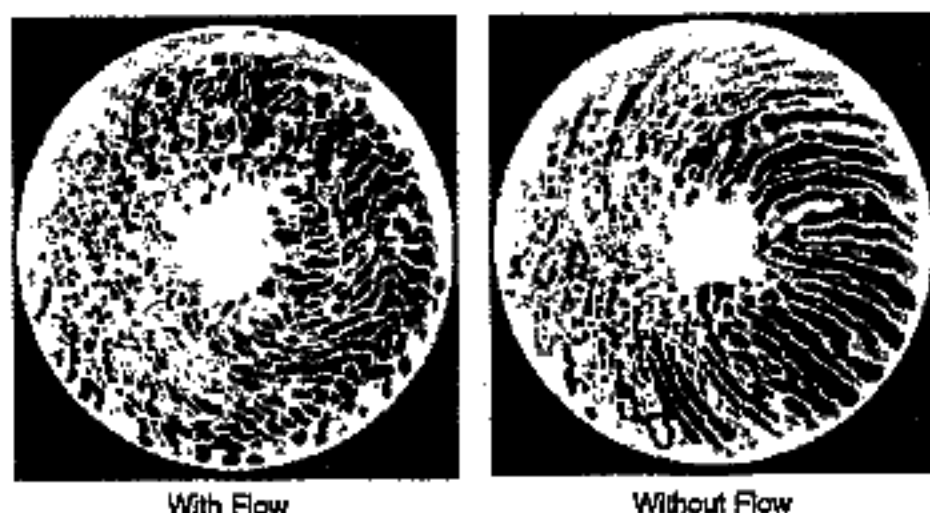


図 3.1 強く切断されたプラズマ流により破された乱流状態の渦巻きのシミュレーション

核融合エネルギー科学では、われわれの乱流と変動の理解がここ数年で大幅に進んだ。アブレーション駆動システムにおける線形および“quasi-to-near 非線形” RT 不安定性の解明が進んでいる。限られた範囲のプラズマ条件について静電気乱流の回転力学や回転流体モデリングにおいて進歩があった。乱流は、エネルギー移転によってプラズマ加熱を行なうことができ、そこからプラズマと磁場の自己組織化が導かれる可能性がある。特別な状況下で、乱流はエネルギー/モーメントを小規模から大規模に移転することができ、回復された対称性を持つ新しい状態さえももたらす可能性がある。ダイナモ効果、磁気シアフローの増幅、ゾーンフローなどがその例である。

とはいえ、空間と時間の解像度は、いっそうの前進が必要な課題である。プラズマ表面相互作用における擾乱の役割、擾乱の発生源、これらの不均一性の影響の進展は、レーザー誘起の爆縮における未踏の課題として残っている。現在のコンピュータは、数値シミュレーションによる乱流流体力学が必要であるという課題に直面している。現在のプラズマ診断学は、プラズマの独自の電磁的特性により、乱流を計測できる絶好の機会を提供しているが（O モードおよび X モードの波動に対する内部反射表面）実験環境が困難でありプラズマの強力な空間勾配、そしておそらく乱流特性にも直面する。

3.2.4 ダイナモと緩和

磁気閉じ込めプラズマのダイナモは、乱流流体運動による大規模な磁場の生成と維持に必要なプロセスである。ダイナモ研究は、惑星、恒星、銀河などに関連した宇宙磁場の存在を説明するために天体

物理から生まれた。ここでは、磁場の存在が抵抗性オームの法則を使った単純な予測と整合しない。ダイナモプロセスは、磁気閉じ込め装置の磁気配位を維持する上で重要な役割を果たすと考えられる。しかし、乱流流体運動からの自然発生的な磁場の成長を伴う運動学的ダイナモの存在を、実験により実証できていない。とはいえ、いくつかの実験が現在開始されている。

関連するトピックがプラズマ緩和である。プラズマ緩和では、プラズマが都合の良い状態に自己組織化する。3D の MHD で記述されるように、乱流を減衰する際、磁場とプラズマ電流が一線に並ぶ静止配位に対する磁気ヘリシティに応じてエネルギーが減衰する。核融合科学では、ブライアン・テイラーが、RFP 装置に、望ましい最小エネルギー状態が得られると予測した。変動誘起ダイナモの同じような観察結果が、スフェロマックでも見られ、それによって、抵抗性拡散時間よりも長い時間にわたってこの配位を維持することもできる。この「最小エネルギー状態」という概念は、太陽、宇宙および天体物理プラズマ研究に強い影響を持ってきた。他の成果としては、MHD モデルの 2 流体モデルの一般化と最新のコンピュータ・シミュレーションの開発などがある。

3.2.5 磁気再結合

磁場の成分が方向を逆転させるプラズマシステムでは、逆磁場成分と交差結合することによって磁気自由エネルギーが解放される。逆磁場は効果的に消滅させられ、放出されたエネルギーを熱と高速の流体運動に変換する。磁気再結合は、太陽表面での爆発、磁気圏の小嵐、トカマクのこぎり歯など、多くの現象に自由エネルギーを機器する。

通常、磁気再結合時のエネルギーの放出乱流は爆発現象に近く、これはシステムに磁気エネルギーがゆっくりと蓄積された後に起こる。研究は、この突然の爆発とそれに伴う放出の解明を目指している。基本的な問題は、磁気トポロジーの変化には通常、磁気フラックスをプラズマ流体に固定する MHD 制約を破るエネルギー散逸プロセスが必要である。しかしながら、ここで問題にしているシステムでは、プラズマは基本的に衝突しない。したがって研究の課題は、観察で見られた高速な磁気再結合を産み出すようなやり方で、衝突しないプラズマ内の固定された状態を破る方法を解明することである。磁気再結合は、核融合プラズマの閉じ込めに大きく影響を与えるが、宇宙物理、磁気圏物理などの分野（磁気圏界面や磁気圏尾の力学）や、太陽大気（太陽面爆発、コロナ大量噴出など）でも重要である。

3.2.6 波伝播

プラズマの力学的進展は、プラズマ成分とさまざまな波の間で行なわれるエネルギーやモーメントの交換（波・粒子相互作用または粒子・波相互作用）が関係した集合的現象によってしばしば支配される。電離圏における高周波伝播に関する初期の研究は、プラズマ内の各種波の理論を発展させるきっかけとなった。今日、モード変換、出力吸収、エネルギー粒子の生成などが関与する複雑なモデルを使って、磁気圏物理と天体物理における、太陽コロナ加熱、太陽風と磁気圏の相互作用、木星系で観察されたサイクロトロンといった現象が記述されている。

磁気閉じ込めプラズマの制御に電磁波を用いることは、当初から核融合プログラムの大きな柱であった。プラズマ加熱と非誘導電流発生の外部的手段は、プラズマ密度、温度、回転、電流、圧力の各ブ

ロファイルの制御、変更を通じて、プラズマのパフォーマンスを高める手段にまで進化した。波とプラズマとの相互作用が局在するという特徴により、最適化、制御手法開発の糸口になり、トロイダル磁気閉じ込めシステムでの高閉じ込め、安定運転体制を長いタイムスケールにわたって保守することができる。こうした波・粒子相互作用を記述する基本的モデルは、実験室でのプラズマだけでなく、宇宙のどこでも自然に発生するプラズマも含めて、すべてのプラズマに共通である（図 3.2 参照）。

3.2.7 非中性プラズマ

非中性プラズマは、全体の電荷が中性ではない帯電粒子の多体集合体である。こうした系は、強力な自己電場を特徴とし、高電流配位では強力な自己磁場をもつことが特徴となる。単一種プラズマは、非中性プラズマの重要な種類である。例として、トラップに閉じ込められた純粋イオンや純粋電子プラズマ、高強度加速器と貯蔵リングにある帯電粒子ビームなどがある。これらの非中性プラズマは、何時間あるいは何日も閉じ込めておくことができ、そのため、熱平行からの制御下での逸脱を容易に研究することができる。こうしたプラズマは、類似粒子衝突によって誘起される伝播、非線形力学、確率的影響、うず形成および併合、プラズマ乱流、強力に結合した純粋イオンプラズマにおける液体様の状態、および結晶状態への相移転などの基礎研究にとって優れた試験台である。

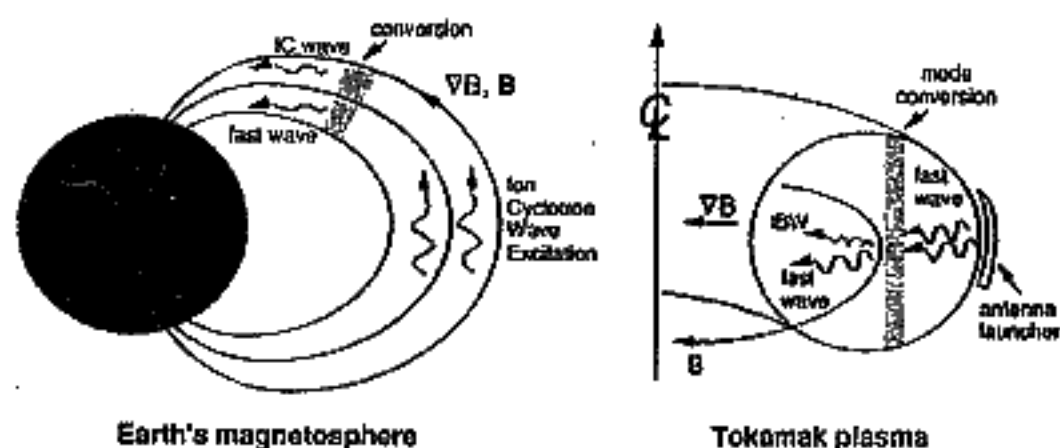


図 3.2 宇宙と実験室のプラズマに共通する電磁波の伝播とモード変換

単一種プラズマの用途には、いつか例を挙げれば、トラップ内での反物質の蓄積貯蔵、レーザー冷却純粋イオンを使った新世代の精密原子時計、イオンサイクロトロン共鳴を使った化学物質の精密質量分光測定、自由電子装置（マグネトロン、サイクロトロンメーザー、自由電子レーザーなど）でのコヒーレントな電磁波、重イオン核融合や破砕中性子源、トリチウム生産、核廃棄物処理などの用途を持つ高強度加速器および貯蔵リング、次世代コライダーに合った高性能な加速器概念などがある。

3.2.8 静電気トラップ

静電気トラップをもとにした商用タイプ慣性静電気閉じ込め（IEC）中性子ジェネレーターは、物理格子か、ベニングタイプの仮想陰極のどちらかを使って、球状のイオンの閉じ込め、加速、焦点へのフォーカシングなどを行なう。イオンは、グロー放電による電子衝撃、あるいは外部イオン源で

形成される。核融合条件を作り出すには、高い電圧(>100kV)と相対的に小さい規模(数 mm から数 cm)が必要であり、絶縁破壊が最も重要な技術研究課題となる。こうしたシステムの規模の小ささと相対的簡素さにより、移動可能な D-D または D-T 核融合中性子源として有用である。独自の核融合炉概念は、高壁負荷、高放射化、トリチウム生産などの核融合工学問題を解決するために、高い Q で稼動する大幅にモジュラー化された中性子源群を使用している。物理格子を使用するトラップ(通常 IEC マシンと呼ばれる)は、試験装置あるいは商用装置として、有用な中性子出力が得られている。ダイムラーベンツエアロスペースは、ほとんど実用化に近い D-D ユニットを開発した。仮想陰極マシン(通常はベニング核融合や PF マシンと呼ばれる)は、非熱電子分散、球状フォーカシング、優れた電子エネルギー閉じ込めの維持という物理目的が必要であることを実証した。そして仮想陰極マシンは、イオン物理の研究に取り組める状態にある。



図 3.3 商用 IEC 中性子発生器

3.2.9 原子物理

原子衝突と放射過程は、加熱、冷却、閉じ込め、粒子輸送、高温炉心プラズマの安定性、磁場閉じ込め核融合装置の低温エッジ、ダイバータープラズマに決定的な影響を及ぼす。炉心プラズマでは、高電離した不純物が電離バランスと励起状態の分布を決定する。これらのパラメータの分光器計測は、プラズマ温度と不純物密度に関する情報を提供する。いずれの融合炉設計でも電力/粒子排出とプラズマ診断法が中心的問題になることから、原子物理プロセスがどのような場合も重要になるだろう。

低密度高温炉心核融合プラズマに関係した原子衝突断面と原子構造データの特徴分析に大きな前進が見られた。これは理論的近似値を試験し有用なスケーリングを発見するためのベンチマークシステムを探求する途上で見い出され、実験と理論の間の連携によって達成されたものである。低エネルギー弾性散乱、モーメント移転、核融合プラズマ内にあるさまざまな原子とイオンの相互作用の粘性断面などに関する包括的データベースを作成する試みが続けられている。

3.2.10 ICE/IFE(慣性核融合エネルギー)におけるオパシティ

高温高密度プラズマにおける原子とイオンの物理は学際的領域である。原子の方は、非常に重い原子や多価に電離した原子まで含めた原子構造理論から構成されている。これには、相対論的効果や量子電磁気力学(QED)効果も含めなければならない。こうしたイオンとプラズマとの相互作用は、状態方程式(EOS)や高密度物質の動的特性にとってもだけでなく、ICE/慣性核融合エネルギー(および天体物理)プラズマの放射特性にとっても重要である。慣性に限った具体的な用途は、ペレットと X 線ホーラムの放射流体力学、分光器診断法、z ピンチ X 線源などである。

放射線物理の主たる関心は、荷電状態と励起単位ポピュレーションの動力的モデリングである。非プランク放射電磁界にある非均質なプラズマの場合、このモデリングが多くの放射輸送方程式、(磁気)流体力学方程式と結合した衝突放射率方程式の数値解を必要とする。計算物理問題における原子

物理の難しい課題は、現実的な、衝突係数（非 Maxwell 電子分布の場合の断面）、遷移エネルギーと確率、光子断面積、磁力線プロファイルを提供することにある。計算上の理由から、通常、こうした大きな動力学モデルの代わりに簡略なモデルでは詳細な原子構造を省略し、高励起された状態を省略している。高密度では、前者の簡素化法は、線スペクトルの広がりによって物理学的に正当化できる。後者の簡素化法は線スペクトルの広がりと密接な関係にある連続線の低下がその根拠となる。密度が十分高く、非プランク放射電磁界の影響があまり小さくなく、したがって局所熱力学均衡（LTE）に近づいている場合は、さらに問題は緩和される。こうした状況では、非平衡熱力学、線形応答理論を使って、LTE からの逸脱を優れた精度で計算することができる。

3.2.11 プラズマ診断

プラズマ診断は、多種多様なプラズマ装置で計測を行なうための計測法である。これは、電磁放射線、磁場、原子粒子、重原子粒子、金属プローブを能動的あるいは、受動的に使用する。診断データは、プラズマの基本的特性を提供するものとして分析コードに統合される。こうしたデータを積極的に活用することにより、プラズマ空間的パラメータなど、プラズマ性能とフィードバック制御を改善できる。理論的モデリングとシミュレーション能力の向上は、計測能力の向上とともに、実験と理論の相互作用を飛躍的に改善した。

この数年間で、磁場核融合エネルギー（特にトカマク）、慣性核融合エネルギーについてのプラズマ診断能力は大きな進歩を遂げた。新しい技術開発により、多くの観察用ライン（急勾配があるため必要とされる）と乱流を完全に解明するのに必要な高速解像度を有するシステムが実現された。こうした進歩は、急速に改善された理論モデリングと密接に結びついている。現在のトカマクでの計測機能のほとんどは別の装置にも使用でき、この応用も新しい開発の要素である。

3.2.12 プラズマシステムのコンピューターモデリング

プラズマシステムと補助システムの計算モデリングは少なくとも 1970 年代前半から磁場核融合エネルギーと慣性核融合エネルギー両方の重要や構成要素である。これらのコードは、プラズマ物理を外部源と統合し、微細なプラズマ挙動を解釈、予測するために使用される。現在の磁場核融合エネルギー伝播シミュレーションコードは、MHD 平衡を粒子の流体伝播方程式、モーメント、エネルギーと結びつける。慣性では、シミュレーションは研究しているターゲット設計に関連したプロセスを組み込んだ流体力学コードで行なわれる。磁場核融合エネルギー、慣性いずれの場合も、モジュールまたはアルゴリズムは、利用できるコンピュータシステムがサポートしているプラズマ物理に関する最良の知見が組み込まれる。

磁場核融合エネルギーでは、強調する構成要素物理がそれぞれ異なる、したがって、対象としている用途の種類がそれぞれ異なるさまざまな流体伝播コードを使用している。実験解釈用のコードは、実験データを最大限に活用して、閉じ込め特性を導き出す。それに対し予測用コードは、実験検証用のモデルと新しい実験の設計に活用されている（図 3.4 および 2.20）。現在慣性に使用されているシミュレーションコードは、基本的にエネルギー省-国防プログラムが資金を提供して作成された一次元と二次元の流体力学コードである。慣性研究に使用されている既存の一次元と二次元の流体力学コードは厳重にチェックされ、既存の慣性施設で得た実験データに照らして妥当性が確認されたものであ

る。輸送モデリングコードは、プラズマ挙動を解釈、予測する上で決定的な役割を果たしてきたが、構成要素モデルの多くの面は経験的なものである。多次元シミュレーションの目覚ましい進歩は、それに続く他のプログラムのモデルとして役立ってきた。

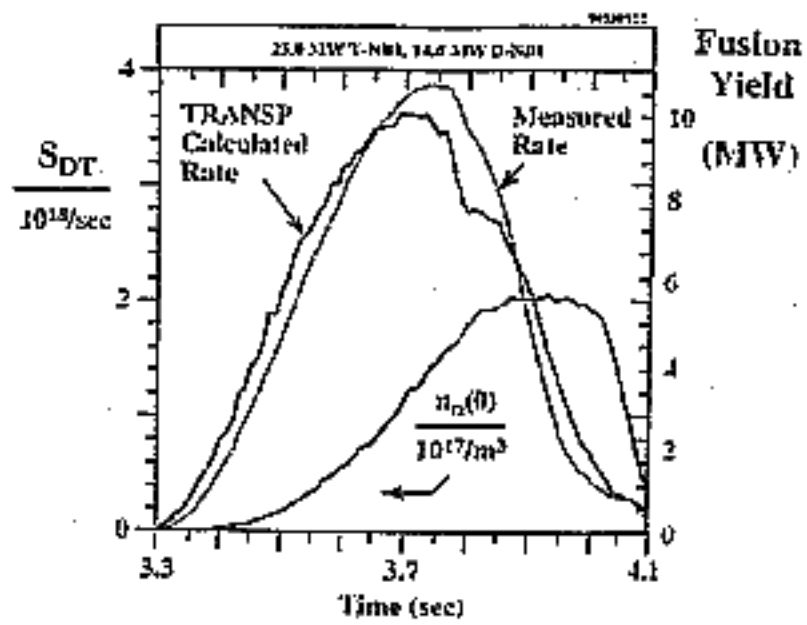


図 3.4 核融合発電の時間的推移。核融合発電の TRANSP 計算と、プラズマ出力が最高になる TFTR プラズマの中心 α 密度の TRANSP 計算。

3.2.13 高密度物質

極端な条件でさまざまな材料について正確な状態方程式(EOS)を行なうことは、信頼できる慣性/慣性核融合エネルギーターゲット設計を得るうえで絶対必要である。現在、妥当性が実験的に確認され、あるいは主ユゴニオだけで確認された高圧（数メガバール以上）EOS が明らかな材料はごくわずかしかない。物質の密度を極端に高めることにより、惑星科学の基盤を得、超硬度材料、超伝導材料、エネルギー材料などを生産する新しいアプローチを産み出すことができる。惑星と恒星の内部においては、圧縮は重力によるものであり、等エントロピー的である（位相分離は無視する）。地球では、大規模レーザー施設、パルスマシン、ガス・ガン、爆発物などを使って、静的圧縮手法（ダイヤモンド・アンビル・セル）や動的圧縮手法により高密度を達成することができる。

動的圧縮実験は、土壌の中核近くにある木星の惑星の外部から直径 25%までのところ、そして低質量恒星の外部に存在する物質状態を再創造するうえで長足の進歩を遂げた。大規模レーザー施設で最近、ガス・ガンよりも格段に高い圧力で物質 EOS を作りだし、特性分析することに成功した。また複数の実験手法が最近開発された。（オバシティを決定するための）X線撮影、光学伝導度、温度、転位、X線回折、速度/転位感受性インターフェロメトリーなどは、いずれもレーザー衝撃 EOS 実験で現在使用されている診断法である。

3.2.14 高エネルギー密度実験室天体物理学

天体物理学モデルは、制御下にある初期条件が明らかで制御された実験ではなく、観測結果に基づいてルーチンでテストされている。研究対象によっては高いエネルギー密度が必要なため、実験室での代替天体物理学環境を作り出すことは、これまでは不可能だった。さらに、研究している問題の物理は、何桁もの空間尺度にわたってスケーリングされる。電離媒質での強力な衝撃、高マッハ数の超音速ジェット、強結合フェルミ縮退物質、低粘度の高温圧縮した物質における流体力学不安定性、X線によって支配される電磁放射伝播、光蒸発前線と結合放射性流体力学、そして高圧の EOS のような材料特性などがその例である。実験は、NOVA（米国ローレンス・リバモア国立研究所）と Gekko（日本、ILE）で行なわれており、文献の形で詳細に報告されている。現在実験が Omega（米国、LLE）で進行中である。Omega、NOVA、Gekko の各レーザーの実験も、乱流、混合、物質フロー、超音波ジェットなどの流体力学研究、高圧での材料特性、電離元素のオパシティなどの研究を中心に行ってきた。

3.3 工学で注目を浴びている分野

3.3.1 大量材料科学

幅広い工学/材料科学分野で核融合材料科学研究が好影響を及ぼしてきた例は数多くある。例えば、既存の鋼材に比べて優れた靱性と強度を持つペイナイト（Fe-3Cr-W-Ta）鋼が核融合研究で開発されたが、これは、数多くの商業システム（化石エネルギーなど）で将来利用できる。核融合研究は、高い抗酸化特性を持つ SiC/SiC 合成物における境界の改善をもたらした。核融合研究者によるセラミックスの基礎研究は、SiC、アルミナ、スピネルにおける点欠陥（間質）移動エネルギーの初の実験測定につながった。

中性子照射金属の実験分析と理論分析は、力学的変形の基礎の解明に貢献している。この力学的変形は、数多くの工学分野に極めて大きな影響を及ぼす。例えば、中性子照射物質の分析からツイニング（固体で起こり得る 6 つの力学的変形の 1 つ）の構成方程式を得ることが可能であろう。現在解明されている破断力学（あらゆる高度な工学構造用途に不可欠なもの）のほとんどは、中性子照射物質に関する初期の研究に由来している。さらに、変形した金属の流れと破断の物理的メカニズムについてはさらに基礎研究が必要であり、これは、現在核融合研究で研究されている中性子照射物質の分析に関連するものから容易に得ることができる。耐熱金属の力学的変形の科学が、バナジウム合金やその他耐熱金属での核融合研究によって大きく前進している。

3.3.2 表面材料科学と原子物理

この 15 年間の閉じ込め装置性能の改善にとって、エッジ密度と不純物フラックスの制御の改善は重要だった。実験とモデリングを組み合わせることで、プラズマ対材料界面で発生するプラズマ物理、表面科学、ソリッドステート物理間の複雑な相互作用の解明が進んだことにより制御の改善はなされた。

リサイクルされた粒子がプラズマの燃料となることから、プラズマ粒子フラックスのうち、表面やバルク材料に捕捉される部分が、エッジプラズマの密度に強い影響を及ぼす。スパタリングや、蒸発化

学腐食などの、表面からの粒子の放出を制御するメカニズムを解明するために、こうなる表面科学実験が行なわれている。ここではガス放出を低減できる表面と被覆の除染法が研究されている。プラズマ対向材料におけるプラズマ粒子の輸送を解明するには、化学と固体物理学を組み合わせることが必要である。腐食量または腐食された粒子の本流プラズマへの返送のいずれかを制御するためにさまざまな手法が開発されている。さらに、スパタリング・プロセスのエネルギーと角度依存性を詳細に実験室で測定することにより、このスパタリング現象の基本的な解明が進んでいる。

腐食された材料は、エッジプラズマを通じて炉心プラズマに輸送され、反応度の低下を引き起こす。腐食された原子の電子またはイオン衝撃電離により、原子は近くの表面に向かう磁力線に追従する。こうした影響を解明するには、プラズマ物理と原子物理を組み合わせることが必要であり、こうした現象を調べるための大規模な実験室研究や核融合装置による研究が行なわれている。こうした影響のモデリングには、流体輸送、プラズマ物理、気体輸送、原子物理などを結合させる必要がある。材料表面、プラズマエッジ、プラズマ炉心モデルの統合が次のステップであり、多くの研究分野の研究成果が必要になるだろう。

3.3.3 流体/真空インターフェースでの伝熱

液体壁システムプラズマと対向する自由流体表面の温度は、プラズマ・チャンバーに蒸発する液体の量を支配する重要なパラメータである。非導体液体壁の自由表面での伝熱は、温度勾配駆動粘度変動によって自由表面近くで発生するか、摩擦せん断応力によってノズル近くで発生するかのいずれかの乱流渦構造による急速な表面リフレッシュの現象によって支配される。こうした乱流構造の強度と、自由表面から液体壁のバルクフローへ燃料を循環させる有効性は、本流のフローの速度、自由表面の安定性、後部壁とノズル表面との距離、磁場によるダンピングの程度、さらには表面熱フラックスの大きさと分布にも大きく依存するだろう。これは、困難な学際的科学問題であり、海洋学、気象学、冶金学、ロケットエンジンなど高いヒートフラックスの用途にとって重要である。

液体金属の場合は、様子が違う。液体金属は、磁場によって完全に薄片化される。ただし、液体金属は大きく波打ち、磁力線に沿った渦巻き運動を伴う二次元の乱流に似た構造を持っている。表面波と二次元乱流は、伝熱の面積を拡大し、熱をバルクフローに変換するのに役立つ動きを持っている。伝熱の観点から液体金属壁の実現可能性を必要するには、夏伝導が支配する場合と放射輸送の効果が重要な場合、これらの項目の相対的重要性を解明し、粗いスクリーンのような乱流促進物を使用することの有効性を判断することが必要である。複雑な流体力学が現在、印加される磁場やオームの法則やマックスウェルの方程式を通じたプラズマ運動と密接に結びついている。こうしたシステムの解決策は、プラズマにおける MHD 流体運動に似た複雑さを持っている。

3.3.4 アブレーション、放射流体力学、圧縮

ターゲット爆発に続く慣性核融合チャンバー環境の決定問題は複雑であり、学際的研究の 1 例である。爆発したターゲットから出る X 線、中性子、破片は、チャンバー壁が吸収しなければならない。そして、次のショット前に、適切に静止した状態を回復しなければならない。解明しなければならない現象には、気体と圧縮された物質における光伝播、時間依存中性子伝播、電離気体力学、電磁放射流体力学、アブレーション、急速加熱した表面の熱物理、大規模自由自由流体力学などがある。シミュ

レーションツールは、こうしたさまざまなプロセスをモデリングするのに開発、改善されてきた。チャンバーの関連するすべての物理をシミュレートするコードへの統合に向けて研究が進んでいる。

3.3.5 物質中の中性子伝播と光子伝播

中性子および光子と物質との相互作用を解明することは、多くの核科学の応用分野にとって不可欠のことである。D-T 反応から出る高エネルギー中性子 ($\sim 14\text{MeV}$) はチャンバー壁を貫通し、その結果いくつもの反応を生じさせる。中性子相互作用から発生する光と慣性核融合の X 線は、さまざまなタイプの物質との相互作用を行う。モンテカルロと決定論的方法を使って、中性子フラックスと γ 線フラックスを決定することができるが、その精度はその背景にある伝播方程式と核データの数値近似に依存している。中性子断面と光子断面のデータは、核科学に大きく依存している。二体、三体、N 体の各多体反応ごとのモデルは、新しく登場した反応生成物のエネルギーと角分布の正確な再現を評価できるよう発展途上にある。この情報を処理しやすいフォーマットと手順のついた利用しやすいファイルで表すことは、核データ開発において現在も取り組まれている分野である。

3.3.6 ベブルベッド熱力学

材料の熱力学は、固体増殖ブランケット設計、特にベブルベッドの形態の材料にとって決定的に重要な問題の 1 つに挙げられている。基本的な熱物理特性データは、正確に定量化しなければならない。ベブルと運転中のベッド/被覆材相互作用を通じたバック状態の変化は、パフォーマンスを左右する大きな影響力を持っているため、解明する必要がある。

接触固体粒子から構成される微粒子ベッドの熱力学挙動は複雑な現象である。接触があることによって、個々の粒子の自由な運動、したがってベッドの強度と剛性の条件が制限される。これは、それ自体、粒子の粒径、形状、靱性、さまざまな相間の熱または力学的相互作用の性格、対象になっている粒子物質の状態などの接触結合の数と強さに依存する。こうした研究は、基本的な熱物理力学特性データと、微粒子ベッド材システムの熱力学的パフォーマンスの解明と延長に必要な工学科学知識基盤の前進につながる。

4.1 はじめに

プラズマとそれに関連する技術の実用的応用は、政府や国民経済にとってますます重要になっている。

(プラズマ科学：技術応用へ向けた基礎研究：国立研究委員会、ワシントン D.C.1995 年

プラズマ処理：科学的可能性と技術挑戦：国立研究委員会、ワシントン D.C.1991 年

S.O. Deam “プラズマ応用と核融合研究”、J. Fusion Energy, 第 14 巻 No.2 251-279 頁

(1995 年 6 月))

技術、理論モデル、そして計算機ツールはエレクトロニクス、生産現場、健康管理、環境保護、宇宙航空、そして繊維分野をはじめとする様々な商用用途として役立っている。これらの複合プログラムは核融合研究計画から移譲され、あるいは取り入れられる。核融合炉用に開発された特殊技術が短期的な工業応用や政策上の要請に応用できるインパクトある展開の可能性は数多くある。たいていの応用では多分野にまたがったアプローチが必要で、プラズマ物理は化学、原子物理、物性、熱力学、機械工学、そして経済学との統合が不可欠である。核融合エネルギー科学基金がこのプラズマ R&D の政府スポンサーである。個別研究費を与えてプロジェクト研究に導きながら、国立科学基金は 3 つの工学研究センターを支援してきた。その 3 つとは (1) ノースカロライナ州立大学での先端電子材料プロセス研究、(2) ウィスコンシン大学でのプラズマ加工研究、そして (3) アリゾナ大学での環境良半導体加工研究である。

4.2 今後の展開

4.2.1 マイクロエレクトロニクスとフラットパネルディスプレイ

今までのところ、プラズマ科学にとって最もインパクトのあるものは \$1T (1 兆 \$) のマイクロエレクトロニクス工業への応用である。プラズマ技術は半導体製造のあらゆる分野に行きわたっている。

(図 4.1) 主要製造装置は頻繁に置き換えられ、モアーの性能ダブリング期 18 ヶ月と一致している。

現在、プラズマ技術はシリコンウェハーから最終集積回路に至る製造工程の 25~30% で使用されている。この割合は来る 10 年間で増えると予想されている。

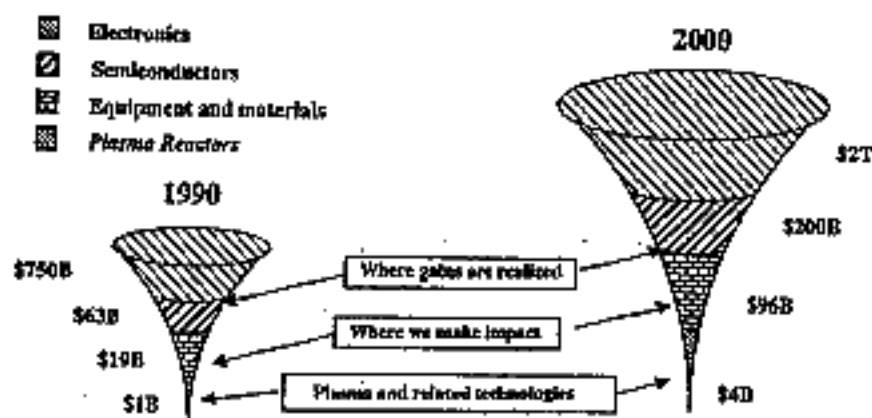


図 4.1 電子的食物連鎖の全体像 (LAM Res 社、R.A. Gottscho 氏より無償提供)

半導体製造装置の市場は約\$100B (1000 億\$) 規模である。プラズマはエッチング、クリーニング、そして成膜に有効である。ほとんどの技術は核融合研究外の個人に雇われた有能な化学技術者により開発されてきた。しかし、彼らは、高周波やマイクロ波、プラズマとウェハープロセス制御診断、ビーム源およびレーザー源、理論モデルとアルゴリズムのような核融合技術の恩恵を受けてきた。年間売上がそれぞれ1 億ドルを超える2 つの会社が、核融合プログラムから生まれている (図 4.2 参照)。さらに、民間部門と核融合エネルギー科学局センター間で多くの共同研究・開発が行なわれている。共同 R&D 協定 (CRADA) は、プラズマへの高周波磁場貫通の基礎研究からプラズマ (スルーブットや収率を最適化する)、高周波システム、ヒートシンクに使用する高性能ハイヒートフラックス材、まったく新しい種類の極紫外線リソグラフィ源に至るまでさまざまな活動が関与している。



図 4.2 核融合スピンオフ企業における半導体加工に使用するプラズマ源

現在のプラズマ光源の限界をやぶるべく、リソグラフィの新しい要件を設定する 100 ナノ秒単位の機能サイズの回路パターンを作成する必要がある。プラズマ源は、こうした要件を満たすことができる。これらの要件を満たすレーザー生産プラズマと放電プラズマを開発するために、民間企業が資金を拠出し、大手半導体メーカーと3 つのエネルギー省研究所が共同で設立した3 ヵ年計画の2 億 5000 万ドル規模のコンソーシアムが進行中である。別の補完的 DARPA プログラムが、電子ビーム・リソグラフィの有効性を調査している。

イオン注入の新しい要件は、新たな展開の機会でもある。高性能 VLSI 半導体装置は、低エネルギー注入、高処理能力、低コストを特徴とする、ここでは深さ 100nm という極めて浅いジャンクションを使用している。従来のビーム線注入装置が作り出す電流は比較的低く、スルーブット要件を満たせない可能性がある。プラズマ浸漬法は、大きなウェハーに高い露光線量を必要とする半導体製造において使うビーム線処理用ビームラインに代わる魅力的な方法である。処理時間は、注入面積に依存せず、比較的シンプルなプラズマ浸漬装置半導体製造で現在使用しているクラスターツールに組み込むことができる。

プラズマ処理の複雑な学際的性格からすれば、理論的モデリングとシミュレーションはどうしても必要である^{*}。イオン化と衝突過程を含んだスーパーコンピューター用モンテカルロコードがトカマクにおける輸送と熱流研究のために開発されており、これがプラズマ加工の同様なシミュレーションを行うのに用いられている。

フラットパネル表示板 (FPD) は情報技術 (IT) 分野幅広く用いられている。2006 年における世界

^{*} プラズマ加工におけるモデリングとシミュレーションの必要性、国立研究委員会、ワシントン D.C. 1996 年

の FPD 需要は 400 億ドルに達する。その応用はコンピュータ、車両搭載ディスプレイ、パーソナルデジタル機器、テレビ電話、医療機器、そして高精細ビデオに及ぶ。プラズマは FPD の大面積トランジスタ製造におけるエッチング、クリーニング、成膜、そして埋め込みに必要である。高輝度かつ大規模 FPD にプラズマ自体が使われている（プラズマディスプレイ）。

4.2.2 材料と製造

最近 10 年でプラズマの産業応用や非半導体製造の分野にも広がりが見られる。これらの応用には材料の表面硬化処理や光学素子の表面コーティングなどがある。製造の分野ではプラズマスプレー、窒化処理、合成、そしてマイネトロンスパッタ装置や金属蒸気アーク (MEVVA)、イオン打ち込みを用いたプラズマエッチング、化学的成膜法 (CVD)、物理的成膜法 (PVD) などがある。

航空宇宙、医療、伝統的長大製造業、新興のハイテク産業などで使用するナノサイズの装置や高性能材料など用途は爆発的に増えており、そうした用途に役立つために、既存の表面工学手法を精緻化し、向上させ、新しい手法を開発することが必要である。表面工学手法の市場は、この 30 年間で急速に拡大している。北米、日本、西欧全体で 400 億ドル以上が、表面工学研究開発に投じられている。”

プラズマスプレー技術は、核融合科学と技術の成果を取り入れ始めている比較的成熟した技術である。高ヒートフラックス材を作り出すために使用するスプレー技術は、自動車部品や製造業で使用する最先端のコーティング用としてスピナウトされた技術である。

プラズマ窒化処理もまた比較的成熟した技術であるが、化学工学分野で開発されたガス窒化処理がその起源である。今までのところ、プラズマ窒化処理研究者と核融合研究者との間のまとまった連携はないが、窒化業界は、核融合研究者との共同研究開発、特に性能向上 CVD 分野での研究開発に関心を寄せている。性能向上 CVD は、低い処理温度で高い付着立を可能にする。核融合科学プログラムで開発された実験手法とモデリング手法は、製造物や機械工作工具、バイオマテリアル、センサー、ヒートシンク、X 線窓その他多くの分野でのダイヤモンド被覆やダイヤモンド様・カーボン (DLC) 被覆の付着に大きな影響力を持っている。

プラズマ浸漬イオン注入 (PIII) は、核融合技術研究からの直接の派生物として開発された工業表面工学の手法である。1986 年に初めて開発されたこの工程はこれまで世界 55 グループ以上にまで分化発展している。核融合プログラムでそれに関連したスピノフには、MEVVA 技術がある。これは、周期表元素のほとんどを含むイオン各種によるターゲットの高スルーットでイオン注入することができる。

4.2.3 環境保全用途

現在われわれが最も懸念している問題は、将来の世代にわたって良質な環境を保護することである。人々はこれまで、大量の有害廃棄物と汚染を引き起こしてきた。こうした状況は解消しなければならない。さらに、廃棄物の発生と汚染を防止または低減するという極めて重要な課題がある。エネルギー省核兵器生産と環境保護局スーパーファンドサイトの除染、埋め立て、工業排出物、家庭排水など

による水汚染、有害排出物質の大気への放出の禁止などがその例である。

プラズマ科学は、環境保全のニーズに大きく貢献することができる。除染活動は現在化学業者が中心となっているが、除染活動には物理の観点も必要である。核融合エネルギーが最終的に開発されれば、化石燃料や核分裂発電プラントに伴って現在発生している廃棄物や汚染を削減またはゼロにすることができる。しかし、それまでの過程で、プラズマで得られた多くの知識や、プラズマを発生させ、制御、監視するために開発された付随技術は、環境保全ニーズの展開に大きな利益をもたらすことができる。

現在の研究開発には、(1)混合放射性廃棄物対策、(2)高速な処理能力、排出物の低減、低コスト廃棄物処理、(3)揮発性有機化合物などの有害大気汚染物質 (HAP) の破壊、(4)表面の非破壊的除染、(5)工業、発電、廃棄物焼却における現在の熱処理工程からの微粒子排出物その他の HAP の除去、(6)SO₂ および NO_x の全廃、(7)金属、ダイオキシン、フロンなどの汚染物質の高感度かつ正確に連続モニタースystem、そして(8)CO₂ および温室効果ガスの削減および除去と CO₂ 隔離技術の研究などである。



図 4.3 化学廃棄物を破壊するための誘導結合大気プラズマトーチ

将来の展開の可能性は数多くある。短期的には、アーク工程、プラズマ装置、プラズマ援用モニタリング技術、高性能診断の環境保全工程への応用などで漸進的な進歩が見られる。従来の工程には、モニタリング、制御技術の改善に有益であろう。長期的には、プラズマの廃棄物対策への高度な応用技術が開発されるだろう。プラズマは、短期的なアーク工程で使用されるような単なる熱源としてだけ

でなく、むしろ有害廃棄物を破壊するために使用されるようになるだろう。高いスループットや効率的な操作を実現した新しい大気プラズマ発生技術（図 4.3）が開発されるだろう。可搬式ユニットや現場でのガラス固化技術が実用化されるだろう。そして、より汎用性のあるプラズマ処理能力が実現されるだろう。

4.2.4 生体医療と食品の安全化への応用

発展しつつある医療診断技術や処理の分野の元をたどると磁場や慣性核融合にその起源を探ることができる。例えば、近年進歩しつつある磁気共鳴画像（MRI）の磁石技術は核融合プログラムの超伝導コイル技術が先導したものである。MRI 技術用磁石を年商 1 億 \$ スケールまで引き上げる共同ベンチャーが立ち上げられている。全く新しい医療画像システムが発明されてきた。例えばマイクロインパルスレーダー（MIR）が外傷、脳卒中、血腫のすみやかな検出を可能にしている。小型のマイクロ波素子が電磁波パルスを放射し、レーザー核融合用に開発された高速パルス技術により時間分解記録されている。MIR は従来の MRI や CT スキャンにとってかわり、緊急処理室や救急車における低コストな事前スクリーニングを可能にしている。この MIR の市場予想は年 2 億 \$ となっている。

核融合プログラムから派生した治療方法には、レーザー手術と組織溶接とそれに付随するコンピュータ制御などがある。核融合プログラムで開発されたウルトラショートパルス（ $\sim 10\text{ps}$ ）レーザーは、周辺組織を損傷することなく、精密な切断を可能にすることによってブレイクスルー技術を実現している。これは、歯、脊髄、神経外科で大きな成果を発揮している。

脳卒中患者のレーザー治療も、核融合プログラムから派生した商業部門である。米国で毎年約 70 万件の脳卒中が発生し、その治療費とリハビリテーションに 260 億ドル以上の資金が費やされている。脈管内光音響再疎通術と呼ばれる極めて非侵襲性の技法が開発されている。レーザー光は、光ファイバーを通じて送られ、それが閉塞部の機械的破壊を引き起こし、血流を回復させる。直径わずか 3mm という脳動脈でも治療が可能である。

最後に、プラズマは非金属手術器具の滅菌にも使用されている。体腔の検査に使用する複雑で内曲した構造物の滅菌もできるような手法も開発されている。こうした同じ手法は、食品の再利用容器の滅菌にも使用される。プラズマの電波発生技術は、液体の低温バスタライゼーションに使用される。

4.2.5 プラズマ推進

プラズマを基礎とした宇宙飛翔体の推進は興味を増しつつある。電気エネルギーにより加速噴射が発生する。このときの加速体はイオンであり、加速に続いてプラズマ中性化がなされる。プラズマ推進技術にはアークジェット、イオン推進、ホール推進、電磁プラズマ力学推進、そして高周波駆動プラズマ推進などがあり、動作モードにはパルスモードと連続モードがある。プラズマ推進は従来の化学的推進よりも高速噴出であるため、より大きな特性インパルス（推進力/質量）を保たれる。その応用には静止衛星の位置制御、低軌道衛星の地球引力補正、そして惑星間や宇宙探査の高特性インパルス推進力発生、などがある。

ここでいう高特性インパルス推進力発生とは従来の化学燃料よりも小さな質量で宇宙船の使命が果た

せることを意味している。衛星の数は急激に増えており、特に世界の通信に必要な低軌道衛星が目立つ。核融合と推進研究との重なり領域には電場と磁場が交替する場で無衝突プラズマ流が存在する。これらのシステムは核融合や多くの診断技術に共通する技術が使われている。

プラズマを基礎とする多くのシステムが現在使用中もしくは将来、宇宙探査に用いられることだろう。ロシアの宇宙計画ではホール推進が 25 年にわたって使われている。ホール推進は今や米国、欧州の衛星で使われるのみとなったが、今後 288 個のテレデシック社の通信衛星にはこのホール推進が使用される見込みである。1988 年には米国 STEX 衛星の軌道修正ブーストにロシア製電子推進モジュールが使われた。イオンエンジンは 1988 年に打ち上げられた深宇宙プローブに搭載された。磁場ミラー配位の新しい高周波プラズマ推進システム VASMIP が太陽系の人類探検用に提案されている。

基礎から R&D に至る展開の可能性：詳細な計測とモデルによりホール推進は緊急な応用にも対応できることだろう。理論的、実験的研究は VASIMR のような新概念を生み出す重要な基盤作りに役立つであろう。技術的進展には小型高周波電源や軽量な高温超伝導体が必要である。NASA は、宇宙用途の電気推進を支援してきたが、研究は極めてパフォーマンス優先、ミッション優先であった。OFES プログラムに比べて、診断と基礎科学は、解明と技術革新の基礎的要素であるにもかかわらず、あまり重点は置かれていない。



図 4.4 宇宙空間でのイオンエンジン