小特集 2050年にトカマク型実用核融合プラントを稼働させるために —ITERの役割とその後の展開—

5. 魅力ある実用化を目指した先進的技術課題

飛田 健次, 小西 哲之¹⁾, 時松 宏治²⁾, 西尾 敏, 日渡 良爾³⁾
(日本原子力研究開発機構, ¹⁾京都大学, ²⁾産業技術総合研究所, ³⁾電力中央研究所)

Challenge to Innovative Technologies and the Expected Market Appeal

TOBITA Kenji, KONISHI Satoshi¹⁾, TOKIMATSU Koji²⁾, NISHIO Satoshi and HIWATARI Ryoji³⁾

Japan Atomic Energy Agency, Ibaraki 311-0193, Japan

¹⁾Kyoto University, Uji 611-0011, Japan

²⁾National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba 305-8569, Japan

³⁾Central Research Institute of Electric Power Industry, Tokyo 201-8511, Japan

(Received 3 October 2005)

This section describes the future of fusion energy in terms of its impact on the global energy supply and global warming mitigation, the possible entry scenarios of fusion into future energy market, and innovative technologies for deploying and expanding fusion's share in the market. Section 5.1 shows that fusion energy can contribute to the stabilization of atmospheric CO₂ concentration if fusion is introduced into the future energy market at a competitive price. Considerations regarding fusion's entry scenarios into the energy market are presented in Sec. 5.2, suggesting that fusion should replace fossil energy sources and thus contribute to global warming mitigation. In this sense, first generation fusion power plants should be a viable energy source with global appeal and be so attractive as to be employed in developing countries rather than in developed countries. Favorable factors lending to this purpose are fusion's stability as a power source, and its security, safety, and environmental friendliness as well as its cost-of-electricity. The requirements for core plasma to expand the share of fusion in the market in the latter half of this century are given in Sec. 5.3, pointing out the importance of high beta access with low aspect ratio and plasma profile control. From this same point of view, innovative fusion technologies worthy of further development are commented on in Sec. 5.4, addressing the high temperature blanket, hydrogen production, high temperature superconductors, and hot cell maintenance.

Keywords:

global warming, energy supply, global energy model, energy market, high beta, profile control, low aspect ratio, hydrogen production, blanket, maintenance, high temperature superconductor, tokamak reactor, fusion power plant

はじめに

ここまでの章では、核融合プラントが実際にエネルギーを発生するまでの技術的な課題について検討してきた。しかし、核融合が将来エネルギー市場に導入され、さらにはそのシェアを拡大して今世紀末までに主要な、しかも地球環境と両立可能なエネルギー源として人類の持続可能な発展を支えるようになるまでには、さらに考察しなければならない課題がある。これまでにも、技術的には開発に成功し、一旦は社会に受け入れられながら、最終的には市場での地位を確立できなかった技術は数多くある。技術開発は社会や市場の要求を分析し、それに的確に対応しなければその意義を失う恐れがあるのである。ここでは、そのような意味で、核融合が将来の市場導入を考えたときに求められるであろう要件とそれへの対応について考察した。少なくとも現在のエネルギー市場と大きく違うであろうことは

corresponding author's e-mail: tobita.kenji30@jaea.go.jp

予想でき、いくつかの点については現在の開発戦略に再考を迫るものもあるであろう。約50年先の未来社会についての考察であるから、そのまま通用しつづけると期待することはできないが、このような視点での検討を核融合研究開発について絶えず加え、開発戦略が社会の動向と大きく乖離しないよう努力することが核融合研究者の義務であると考えられる。

この章では、まず5.1節で、経済的競争力のある核融合が市場に導入された場合の電力シェア予測を示し、核融合開発の重要な意義とされる地球温暖化抑制に対する寄与を明らかにする。このような将来予測はエネルギー供給コスト最小化という尺度での合理的な解ではあるが、実際のマーケットはこのような原則には従わない。もちろん、エネルギーは既成市場であるため競合可能価格帯が存在し、そこを大きくはずれては市場導入の見通しはない。しかし、核

融合の導入を想定する今世紀半ばはエネルギー市場の大規模な拡大と脱化石燃料というエネルギー供給構造の一大変革期であり、新エネルギー技術の導入に対しては各国のエネルギー戦略が色濃く反映され、価格競争性が厳格に問われるとは考えにくい。このような立場から、今世紀半ばのエネルギー情勢の分析とそこから描かれる核融合の市場参入シナリオが5.2節に提示される。5.3節および5.4節では、核融合が社会に受け入れられた後、そのシェアを拡大していくために求められる革新技术に関する炉システム研究者の提言である。(飛田健次, 小西哲之)

5.1 核融合はエネルギー需給と地球温暖化対策に貢献するか?—世界エネルギーモデルによる核融合の導入解析と核融合炉のコスト目標への含意—

5.1.1 エネルギー・地球温暖化対策と核融合をめぐる背景

経済発展にとって必須であるエネルギーの持続的な供給と、とりわけ地球温暖化のような地球環境問題との両立は、1つの大きな世界の関心事である。1988年からIPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル) では地球温暖化の科学的知見をまとめており、過去3回報告書を発行してきた。

IPCCが2001年に発行した第3次報告書 (TAR) [1]のうち、緩和策作業グループによる「政策決定者のための要約」("Summary for Policymakers") では、次のように結論づけている。「…既知の技術オプションは、550 ppmや450 ppmあるいはそれ以下での広範囲な大気CO₂濃度安定化レベルを今後100年あるいはそれ以上の間達成することができる。…既知の技術オプションとは、今日実際に運用されている、あるいは、パイロットプラントの段階にある技術のことを指す。画期的な技術的ブレークスルーを必要とするいかなる技術もそれには含まれない¹。」

TARのこの結論に対し、HoffertらIPCCにも関わっている10名を超える米国の高名な気象学者や海洋科学者は、「『既知の技術』に達していない炭素フリー技術 (以下「革新的技術」と称する) に関する認識がIPCCの結論ではなく、革新的技術は温室効果ガスを排出せずに現在のエネルギー消費量と同等から3倍のエネルギーを供給することが可能である。」との評価を雑誌 Science 298[2]に掲載した。

このScience 298に対して、緩和策作業グループのコアメンバーが、反論を Science 300[3]に掲載した。そこでの議論は、「技術の発明から実験室レベル、技術実証を経て市場でのシェアを得るのに大抵50~70年かかり、現在実験室スケールのものであっても、2050年までに必要とされる温室効果ガス削減 (とりわけ 450 ppmv あるいはそれ以下) に

寄与するには遅すぎる。」というものであった。

それに対する反論として同じ Science 300[3]に、「新技術の市場浸透率は物理定数ではなく、目標を定めた研究開発やイデオロギー、経済的インセンティブにより強力に影響を受けるものであり、例えばアポロ11はプログラム発足から10年未満で月面着陸を成功させた。」という反論が掲載された。

上記の論争の論点は、1)「既存技術オプション」だけ将来のエネルギー需要の増大を満たしつつ、かつ大気濃度安定化が可能かどうか、2) 画期的な革新的技術 (とりわけ核融合や宇宙太陽光発電) が市場に浸透するのに時間がかかるために、2050年までに必要とされるCO₂削減に寄与するには遅すぎるのではないかと整理される。

本稿の目的は、以上のような背景に対して、当方が行った世界エネルギーモデルによる解析[4]をもとに、将来のエネルギーシステムと温暖化対策における核融合の経済性とその導入シナリオについて簡略に述べる。

5.1.2 世界エネルギーモデルによる核融合の導入シナリオ解析

(1) 使用した世界エネルギーモデルの概略

世界を10地域分割した既存のエネルギーモデル LDNE-BN (Linearized Dynamic New Earth - Biomass & Nuclear) [5]に対して、高速増殖炉 (FBR; Fast Breeder Reactor)、核融合 (Nuclear Fusion; NF)、宇宙太陽光発電 (Space Power Satellite; SPS)、バイオエタノール、コールベッドメタン (Enhanced Coal-Bed Methane; ECBM)、メタンハイドレート、大規模植林などの各種の革新的技術を加えたモデル[6]により解析を行った。LDNE-BN モデルは核燃料サイクルとバイオエネルギーの両方のエネルギーと物質転換プロセスを詳細に扱うことのできることに特徴を有している。モデルの計算時点は1990年から2150年までの10年刻みであり、将来の経済的価値を社会的時間選好率により割引いたエネルギー供給システムコストを最小化することで、エネルギー供給構造を描くことができる。

(2) シミュレーションによるケーススタディーの結果

ここでは将来の2つの炭素排出軌跡をシミュレーションする。1つはCO₂濃度制約がない成り行き任せ business-as-usual (BAU) の場合で、もう1つは2100年時点で大気中CO₂濃度550 ppmvを目標とした場合である。エネルギー需要シナリオは、IPCCの排出シナリオ特別報告書 (Special Report on Emissions Scenarios; SRES) [7]の4つの排出シナリオ (A1, A2, B1, B2)²で用いられたものである。

核融合は複数の核融合プラント設計コスト評価値[8-10]の平均値である建設費 3,440 \$/kW と運転費 2.6 \$/MWh を

1 筆者注: ここでの既存の技術オプションと革新的技術の定義に従うと、例えば、現在、屋根置きされている太陽光発電は既存技術オプションだが、変換効率30%超の太陽光発電は革新的技術に相当する。また、自動車に搭載された固体高分子形燃料電池は既存の技術オプションになるが、石炭ガス化固体酸化物形燃料電池複合発電は革新的技術に相当する。文脈からは、画期的な技術的ブレークスルーを必要とする技術として、宇宙太陽光発電や核融合発電が想定されている。

2 SRESでは、21世紀の将来社会がどのような発展を遂げるかにより、「経済と環境」「グローバリズムとリージョナリズム」の2軸を組み合わせて、A1, A2, B1, B2という4つの叙述的シナリオとそれに基づく将来像に類型化している。A1シナリオは「高成長社会シナリオ (グローバル経済)」, A2シナリオは「多元化社会シナリオ (ブロック経済)」, B1シナリオは「持続発展型社会シナリオ (地球規模の環境保全)」, B2シナリオは「地域共存型社会シナリオ (地域からの環境保全)」としている。

Fig. 1 Simulation results of world electricity generated till 2100 under IPCC SRES-A1B scenario for BAU (a) and 550 ppmv (b).

与えるとともに、日米仏における軽水炉の過去の導入速度 [11, 12] を参考にして、導入速度制約として 3 GW/yr-region としたものを、デフォルトケースとした。

Fig. 1 は IPCC SRES-A1B シナリオ下での世界全体での発電電力量を 2100 年まで示した結果で、Fig. 1(a) は BAU の場合、Fig. 1(b) は 550 ppmv 制約の場合である。BAU では安価な石炭が支配的である。核融合は経済性の観点では選択されない。550 ppmv では、非化石燃料の発電技術が急速に導入される。在来型の石炭火力への依存は 21 世紀前半から次第に減少し、21 世紀後半から軽水炉 (Light Water Reactor; LWR) / FBR や CO₂ 回収装置付き石炭ガス化複合発電 (Integrated Gasification Combined Cycle; IGCC)、いくつかの再生可能エネルギー (水力・地熱、地上太陽光発電)、宇宙太陽光発電や核融合がわずかに導入される。

この結果は、1) 将来のエネルギー需要、2) FBR/NF/SPS のコスト、3) NF/SPS の導入速度、に関して必然的に大きな不確実性を内包している。そこで将来のエネルギー需要に関しては SRES の 4 つのエネルギー需要シナリオ、コストに関しては高コストケースと低コストケース、NF/SPS の導入速度に関してはデフォルトケースと、ポテ

ンシャルケースを想定した。これらのケース³の組合せや、FBR や SPS のコストおよび導入速度制約は変更せずに、核融合のコストだけを最小値として、導入速度をポテンシャルとした場合など、複数のケースの組み合わせによる約 30 パターンの感度解析を行った。

その結果、BAU においては、現在なされている核融合プラント設計の経済性では核融合はほとんどのケースで選択されなかった。550 ppmv 制約においては、現在の核融合プラント設計の経済性の平均値では、2060 年から選択されるケースと、2070 年以降に選択されるケース、核融合が選択されないケースが、ほぼ同数あり、2100 年時点での発電シェアが最大 15% 程度となった。しかし、現在の核融合プラント設計の経済性の最低コストの場合であれば、ほとんどの場合で核融合が 2060 年には発電を行い、2100 年時点での発電シェアが最大 25% 程度となる。したがって、現在の核融合炉設計の経済性の最低コスト程度を目標とすることが望まれる。

5.1.3 論争に対する議論

冒頭で述べた論争に対して、以上の解析をもとに可能な範囲で議論を行う。

(1) 『既存技術オプション』のみで将来のエネルギー需要の増大を満たしつつ、かつ大気濃度安定化が可能かどうか』

これについては、『既存技術オプション』だけ (すなわち核融合無し) でも大気濃度安定化は達成可能だろうが、核融合が仮に経済的競争力を有して将来導入されたら、大気濃度安定化に対して導入されたものの貢献を核融合が行いつつ、大気濃度安定化は達成可能であろう』ということになる。

類似する他の数多くのエネルギーモデルによるシナリオ分析が「可能」としているのだから、「既存技術オプション」により大気濃度安定化が達成可能であることには変わらない。したがって核融合がなくても「既存技術オプション」により大気濃度安定化は達成可能である。当方の解析結果の中にも、核融合がなくてもエネルギー需要を満たしつつ大気濃度安定化を達成しているケースもある。

ただし、気をつけなければならないのは、核融合がなくても「既存技術オプション」により大気濃度安定化は達成可能であっても、その理由だけで核融合が不要という結論は導かれないことである。

この解析が示したように、温暖化抑制を行う必要があり、かつ、核融合が現在の炉設計で将来実現可能であれば、核融合が経済的競争力を有して導入される可能性はあり、したがって、大気濃度安定化にある一定の貢献をする可能性があると言える。

まどろっこしいようだが、逆に、大気濃度安定化に一定の貢献をする可能性がある、という理由だけから、核融合

3 高コストケース、低コストケースはそれぞれ、FBR/NF/SPS のすべてが高コストの場合、あるいは低コストの場合である。高コストケースでは、FBR の建設費は軽水炉の建設コストの 2 倍、NF と SPS の建設費は現在提示されている複数設計のコスト値の最大値とした。低コストケースでは、FBR の建設費を軽水炉と同等とし、NF と SPS の建設費は現在提示されている複数設計のコスト値の最小値とした。NF/SPS の導入速度制約に関しては、ともに同時にデフォルト値より大きくした場合をポテンシャルケースとし、SPS の場合はデフォルト値の 10 倍、NF の場合は過去の軽水炉導入速度の最大値 (1979 年仏の 7.6 GW/yr) から 10 GW/yr-region とした。

が必要であるという結論も導かれないことに留意すべきである。

(2)『画期的な革新的技術（とりわけ核融合や宇宙太陽光発電）が市場に浸透するのに時間がかかるために、2050年までに必要とされるCO₂削減に寄与するには遅すぎるのではないか』

これについては、確かにそのとおりである。技術習熟効果が高いガスタービンや太陽光発電、風力発電のような小型分散型技術と比較すると、原子力発電などの大規模集中型発電技術は、いわゆる技術習熟効果が極めて低いことが定量的に示されている。大規模集中型発電である核融合も恐らく技術習熟効果を期待しにくいいため、小型分散型技術と比較すると核融合は市場に浸透するのに時間がかかるであろう。今回の解析によれば核融合が経済的競争力を有してエネルギーシステムに導入されるのは21世紀後半に入ってからであって、2050年以前に必要とされるCO₂削減には寄与できないことになる。

そのためには、早期に核融合発電の第1号実用プラントを建設し、経済的競争力と技術的信頼性を持って電力供給が可能であることを示す必要がある。そしてエネルギー需要が旺盛な国・地域に積極的に建設して、導入基数の実績を増やすことでコスト低減化を図る必要がある。関連して、電力以外の水素製造など、核融合が提供可能なエネルギー供給オプションは多いほうが良い。なぜなら、1つの方法（電力供給）にロックインしないでオプションが多いほうが、人類の核融合反応利用の可能性を拡げることになり、それがひいては、核融合がエネルギーシステムに導入されやすくなることにつながるからである。

5.1.4 まとめ

核融合が実現しないと将来のエネルギー需給を満たすことができないわけではないだろうし、地球温暖化を乗り切れないわけでもないであろう。しかし、核融合が仮に経済的競争力を有して将来導入されたら、エネルギー需給と大気濃度安定化に対して、導入されたたりの貢献を核融合が行う可能性はある。

解析結果を解釈するにあたって、留意点がある。解析結果は、21世紀に利用可能なエネルギー資源や技術の量やコストが完全にわかっている（完全予見）と仮定した上で、(21世紀の世界を見通すことができる神様が)エネルギー供給コストを最小化する（ように計画する）という、「経済的に合理的な」解を求める世界エネルギーモデルから得られたものである。したがって、得られた結果は「経済的に合理的」なのであって、「こうなる」という「予測」ではない。また、現実を簡略化するためにエネルギーモデルが捨象したこと（例えば短期的な急激な石油価格上昇や、エネルギーセキュリティ、環境適合性、社会受容性）は、現実には起こりえるわけであり、それによる影響などは反映できない。この点でも予測ではない。以上の留意点を踏まえると、あくまで、現時点で知りうる限りの“コスト目安”程度と理解頂くべきものである。

また、一般的に技術が実現すれば社会がそのまま直ちに

受け入れるというものではない。核融合という技術も然りで、経済性は技術導入の1つの重要な「必要条件」であるものの「十分条件」ではない。本特集では当方の経済的参入に関する「必要条件」を受けて、プラズマ物理面・核融合工学面から経済性向上の研究に展開されるが、今後の核融合評価研究面で必要なのは「十分条件」の「社会受容性の研究」と思う。

謝辞

核融合の社会経済的側面に関する筆者の研究に対して、研究の機会と親身の指導を下さりました、茅陽一、山地憲治、桂井誠、小川雄一、岡野邦彦、小西哲之、井上信幸の諸先生方と、本藤裕樹、朝岡善幸、吉田智朗、日渡良爾、西尾敏、飛田健次の諸氏に、深く感謝の意を記したい。研究の実施には、東京大学、(財)地球環境産業技術研究機構(RITE)および新エネルギー・総合研究開発機構(NEDO)、日本原子力研究所などからの資金面等での支援を受けたことにも謝意を表したい。本研究は、これらと家族の支援の賜物である。

(時松宏治)

参考文献

- [1] B. Metz *et al.*, Eds., 2001. *Climate Change 2001: Mitigation* (Cambridge Univ. Press, United Kingdom).
- [2] M.I. Hoffert *et al.*, *Science* **298**, 981 (2002).
- [3] B. O'Neill *et al.*, *Science* **300**, 581 (2003).
- [4] K. Tokimatsu, Y. Kaya, "Role of Innovative Technologies for Global Energy and Environment", *19th World Energy Conference*, 5-9 September 2004, Sydney, Australia (<http://www.worldenergy.org/wec-geis/congress>). (日本語版: 時松, 茅, 「エネルギーと地球温暖化対策における革新的技術の役割, 動力, 2004別冊, pp32-45, (社)日本動力協会」).
- [5] 山地憲治編: バイオエネルギー (ミオシン出版, 東京, 2000).
- [6] RITE/NEDO, 「『地球再生』の実実施計画作成に関する調査事業」, 平成14年度報告書51402009-0, 平成15年3月.
- [7] N. Nakicenovic eds., *Special Rreport on Eemission Scenar-ios* (Cambridge University Press, Cambridge, 2000).
- [8] M. Kikuchi, *Fusion Technol.* **30**, 1631 (1996).
- [9] K. Okano *et al.*, *Nucl. Fusion* **40**-3Y, 635 (2000).
- [10] R.L. Miller, *Fusion Technol.* **34**-3Part 2, 364 (Nov. 1998).
- [11] (社)日本原子力産業会議, 「世界の原子力発電開発の動向 2001年次報告」.
- [12] (社)海外電力調査会, 「海外電気事業統計」 2002年版.

5.2 市場参入性向上のための視点

5.2.1 はじめに

5.1節の分析に従うと、核融合は革新エネルギーとして、今世紀の終わりには化石エネルギーを代替して全世界の15-25%程度の発電シェアを占めうる。逆に、このような可能性がなければ、現在大きな資金を投じて研究開発を進める意義は説明困難である。さて、この章で扱う「市場参入」とは、エネルギー市場において核融合プラントの最初の数

機が営業を開始することと考える。21世紀半ばと想定されるこの時期では、電力に限定しても核融合エネルギー市場のグローバル化は疑問である。よって、「市場参入性」を議論するためには、それぞれの国で1号機またはその後続機の実用核融合プラントが導入されるときに状況を分析することから始めなければならない。本章では、21世紀中頃のエネルギー情勢についての考察を述べ、核融合のマーケットを拡大するために留意すべき視点を整理する。

5.2.2 国内市場への導入

今後のエネルギー情勢からみて、核融合が市場原理だけで国内市場に導入されることは難しいであろう。一つの要因が、エネルギー需要の低迷である。2005年3月に総合資源エネルギー調査会需給部会によりまとめられた「2030年のエネルギー需給展望」[1]によれば、日本のエネルギー需要は2020年くらいに頭打ちになった後減少に転ずるという見通しである。2006年から始まる人口の減少にかかわらず経済成長は可能であるが、地方自治体による公共事業の削減や、エネルギー消費が少ない分野への産業構造の変化によりエネルギー需要は減少へ向かうと考えられている。少なくとも、エネルギー需要増を見越して核融合を開発する、ということはあるにないのである。他方、日本のエネルギー供給構造は現段階で非常にバランスが取れていると考えられ、中長期的にみてエネルギー供給構造の変革は比較的小さく、核融合が本格的に市場参入する余地は見出しにくい。さらに、電力自由化も核融合の導入を阻むと考えられ、規制緩和が大胆に進めば電力事業者は中期的視野で利潤を追求せねばならず、業界全体の流れとして低投資のエネルギー源を重視するようになる。このような状況は資本費の高い核融合にとっては大きな障害である。21世紀半ばにおいて核融合をわが国に導入するためには、先行きの運転に不安のある電源を、建替えに際して核融合で代替する、という理由以外には考えにくい。

核融合が市場による電源選択のメカニズムと根本的に相容れないのであれば、国のエネルギー政策の中で計画的な投資を前提とする特定電源として重視してもらわねばならないが、核融合の導入想定時期が高速増殖炉と同じであることが問題点である。近年急速に進みつつある政府と社会との相互作用によるエネルギー政策決定プロセス、いわゆる、エネルギーガバナンスがこの袋小路から抜け出す糸口を与えるかもしれない。実際、これまでの原子力長期計画の変革から、エネルギー政策の決定において社会の影響力が近年次第に強まっていることが見て取れる。例えば、1994年6月の旧原子力長計[2]ではエネルギーセキュリティのため脱石油を重視しており、「2010年に約7,050万kWを達成」と原子力発電の積極的推進を謳ったが、原子力推進政策に対する社会の批判が高まったこと等により原子力の原子力による発電量は2000年時点で3,120万kWにとどまり、現行の長計（2000年11月）[3]の記述は「電源構成に占める原子力発電の割合を適切なレベルに維持」に後退している。現在策定中の原子力政策大綱[4]では、政策決定過程に国民の意見を反映させることの重要性が認識さ

れている。このように、エネルギー技術に関しては政策プロセスの民主化が一層進むと考えられる。この意味で、初期の核融合は、信頼に足るエネルギーとなりうることを示すことはもちろんであるが、社会の後ろ盾を得られるよう環境や安全性に十分配慮し、その将来性に期待感を持たせるものでなければならない。

全く別の視点で、大規模な世界エネルギー市場における日本の揺るぎない足場を築くため、政府主導のもと産業界が協力して戦略的に実用プラントを開発することもあり得る。核不拡散の問題で輸出の難しい高速増殖炉と比べ、核融合はこの点で有利である。国の民間支援は馴染まないように思われるが、1970年代、通産省主導のもと総額1,000億円を超える補助金により、国内メーカーが超LSIおよびコンピュータを共同開発し米国メーカーの独走を阻止したという実例もある[5]。この場合、核融合の国内市場参入の意義はエネルギー供給というよりは、プラントのパフォーマンスを対外的に示すことにある。核融合プラントがグローバル市場商品であることは、すでにITERの物納の段階から運命づけられているといえる。国際競争力を持つためには、ITERの延長上にはない技術、例えば、プラント小型化、免震技術で競合国との差別化を図る必要がある。

5.2.3 世界市場への導入

(1)市場原理と国家の選択

世界市場、ことに核融合が選択肢となりうる時期に、電力の新規需要の圧倒的に大きな部分を占めると予想される発展途上国の場合には、大きく状況は異なる。経済開発の急速に進む途上国では、わが国もかつてそうであったように、需要に応えるエネルギー供給はインフラ整備とともに公共政策で進められ、市場原理は働かないと思われる。先進国の例をみても、電力会社は当初国家ないし公的な企業が運営し、市場とインフラの成熟を待って自由化や市場化が発生している。三峡ダムにみられるように、国家ないし公的色彩の強い事業主体が長期的視野でその国のエネルギー政策を考えたときに導入される、というのが、世界的には核融合にとって多くありそうなシナリオである。つまり、核融合への投資者は、短期的利益追求を行う企業よりも、長期にエネルギー資源確保に責任のある国家や組織が多いものと考えられる。

(2)供給安定性と原子力の制約

2050年代以降にその後20年以上の期間を考えた新規電源を選択するとき、化石燃料は、長期的な価格上昇と先行きの供給への不安、環境制約から、導入が制約されるであろう。つまり、火力発電所を新たに建設しようという国は、たとえそのとき発電コストが安いからといっても、その後20年の間に急速に燃料費の高騰がおこる、需給が逼迫する、あるいは世界的により厳しい環境制約が課せられる恐れがある、という状況では、投資を躊躇せざるを得ない。核分裂原子力も、ウラン資源、濃縮業務、再処理、廃棄物最終処分、社会的受容、核拡散にかかる国際的規制など、経済開発を進めようとする国側、技術を供給する先進国側の双方に制約要因は数多くある。わが国への原子力導入で

も、燃料供給と使用済み燃料処理には供給側先進国（英、米）の保証が存在したが、未来の世界では、原子力発電容量は増大する可能性はあっても、核燃料供給と処理の容量の世界的な大幅な増加は困難が予想される。わが国にしても、国内の燃料サイクルは完結できても、発展途上国への燃料供給、再処理サービスの供給、まして廃棄物処理処分までを引き受ける余裕を持って、それまでも含めた核分裂の輸出ができるとは考えにくい。つまり核分裂の導入をもうるむ国は、燃料サイクル（ワンスルーだとしても）や最終処分への投資も同時に考慮せざるを得ない。核分裂と核融合の比較・競合、というのはすでに核分裂技術とインフラの確立した先進国と、そうでない国では、まったく状況が異なるのである。そのときすでに存在している発電技術やインフラ、市場の中で、短期的にコストの安いものを市場原理により選ぶ、というよりも、これからインフラを構築していく上で、その国社会に長期的に適した電源を公共の視点で選ぶことがずっとありそうなシナリオである。このとき、燃料だけでなく、運転のための物資の安定供給や技術支援体制は、かつての原子力の導入でもそうであったように重要である。核融合も、燃料（ブランケット）サイクルの確立が導入には不可欠であり、リチウム6濃縮、ブランケット製造、放射化した使用済みブランケットの再処理や廃棄物処理までの技術を含む。トリチウムも、初期装荷用に供給不安があると市場導入が困難となる制約の代表的な例である。筆者らがかつて指摘したように、ブランケットのTBRが十分確保できれば初期装荷トリチウムは自給も可能である。

(3) 積算見込みコスト

このように、経済開発の進行している国・地域では、原子力や大規模水力発電の例と同様、核融合の「導入」は短期の電力価格などの市場原理によるよりも、国家や社会の選択が強く働くと予想される。少なくとも、複数の発電会社がその時点（たとえば2050年）に1円でも発電コスト（COE, Cost of Electricity）の安い方法を選ぶ、という事態は、世界の大部分の地域での核融合導入については考えにくいケースといえる。COEは核融合の市場性のひとつのファクターにはなりえても、決してよい指標と呼べるものではない。今世紀半ば以降のある時点で、そこから20-30年の累積発電コストと燃料供給の安定性等を勘案したとき、安価で信頼性のあるものが選ばれようと考えらるべきであろう。建設時点でのCOEはその時代の他の電源より高くともかまわない。しかし、その時点からプラントのライフタイムでの社会的な支出の積算総額は重要であり、この中には初期の建設コストの金利や、燃料資源の長期安定供給性、自給性などの先高感、先行き不安感も考慮する必要がある。その意味で導入時の発電コストは、その将来的見通しを経済的に合理的に説明できる範囲であることが要求されると考えるべきであろう。また逆に、バックストップ技術と呼ばれるように、高価であっても、たとえば石油価格の上限を設定する効果があると認識されれば、導入する意味はある。

初期の核融合プラントが「導入」、つまり最初の一基の建

設がそれぞれの国の国策としてされるとき、その生涯通算発電コストが、原子力や化石資源の燃料供給と使用済み燃料の処理のコストの長期的安定供給に比較して優位になるためには、核融合エネルギーに、従来あまり重視されていなかった観点での課題抽出が要求される。核融合は、これまでよく行われているような、装置価格から推算される発電コストは高くともよいが、長期的な運転コストでの優位を示す必要があるということである。

(4) 地球環境問題と先進国の戦略

言うまでもなく発電プラントの導入では、資金調達が大きな問題であり、特に途上国では先進国からのODAや開発援助などの資金導入も重要な要素となる。ここで、資金供給側の選択が入る余地があり、特に地球環境と核拡散上の配慮は影響するであろう。現在すでに行われているClean Development Mechanism (CDM) がよいモデルであるが、先進国は炭酸ガス削減技術への資金供給で排出権を得る一方、途上国は建設コストは割高であっても資金を得られることで環境適合性の高い技術を導入できる。投資側に（共同事業として行う）先進国の視点が入るのであれば、世界シェア拡大のために早期に輸出で導入するインセンティブになる。途上国が経済開発のために安価で環境対策のない石炭火力などを導入するのを阻止しなければ、世界規模での温室効果ガス放出は抑制できないので、地球環境問題のためにもおそらくこれがもっとも有効な方法である。逆に、先進国で核融合が原子力や再生可能エネルギーとシェアを争っても、環境対策上はまったく意味はない。

この観点で核融合に要求されるのは従って火力発電、特に2050年頃の最先端火力技術と想定される石炭ガス化や天然ガスのコンバインドサイクルに対して競争力を持つことである。本章のはじめに述べたように、核融合の開発意義を説明できる究極目標は世界のエネルギー市場において化石資源を代替することであるので、今後最も化石資源を大量に消費すると思われる分野を代替する必要があるのは明らかであり、核融合にはそのための具体的な戦略の構築こそが求められている。これは、単純なコスト比較ではなく、核融合の導入を選択する社会の要求にどのように応えるか、という問題であり、その結果として研究開発課題は変更を迫られることもありうる。

5.2.4 市場参入性向上のために

(1) 社会に選択されるために

核融合では数千トンの低レベル放射性廃棄物の発生は避けられない。この場合に重要なことは、廃棄処分用地が容易に確保できることであり、浅地埋設処分が可能となるよう適切な低放射化材料の選択、不純物濃度管理も含めた材料組成の調整が重要である。また、廃棄物の減容のためには、クリアランス（放射線リスクが十分小さいものを産業廃棄物とみなすこと）または放射性廃棄物としてリサイクルが可能になるよう、同一材料ごとに分別できるようバックエンドを考慮に入れた機器開発が望まれる。

初期装荷用トリチウムの入手可能性は導入する側としては重大な懸念となりうる問題であった。しかし前述したよ

うに、トリチウムなしでも核融合炉の起動は可能であり、それがなければ核融合炉の導入自体ができない、というような原理的な問題ではなく、フル DT でなくともアルファ加熱による燃焼維持ができるレベルのトリチウムがあれば自立は可能である。このための技術的課題はブランケットの TBR を十分確保すること、インベントリを小さくすることに尽きる。核融合炉を供給する側が初期に供給できれば、あとは設置国側でこの問題に対応することはできる。

核融合の導入は社会の選択があつて起こるので安全性への懸念は許されない。基本的にはどれだけのトリチウム放出があるかが説明できなければならないが、安全のロジックは国により異なるし、原子力がすでに導入されているか否かでも違う。たとえばわが国では採用されていないが、いかなる仮想的事象でも公衆の避難を不要とする Evacuation free の考え方は特に原子力を持たない国への導入に際しては重要となりうる。また、自然バックグラウンドと比べても桁違いに低い核融合プラントが通常時に環境に放出するトリチウムも社会の懸念となりうるので十分な理解と説明、工学的対策が必要となるであろう。一方、大型プラントには何らかの安全審査、許認可方法論が不可欠であり、国際的に認知された技術基準、品質管理システムも必要となる。

(2)世界市場への対応

世界市場を考えると、新規電源の導入にはグリッドへの適合性を考えなければならないが、現在の先進国の電力系統の状況と未来社会のそれは、同じとは考えにくい。特に欧州や米国に比べれば、電力需要の拡大期に核融合の導入機会のある途上国ではグリッドは大規模連携が進んでおらず、容量が小さく、ベースロードが未整備であることも多いと考えられ、多くの場合水力と火力が中心である。先進国では、大規模電源の建替えだけでなく、分散電源化が進む。現在火力発電所が担っている役割を代替することを考えても中小型プラントの需要にこたえる必要があり、核融合炉の特性を考えれば小型化の努力が必要である。ただし途上国の人口の大部分は都市に集中しており、都市人口は先進国より大きいところも多い。また経済開発戦略上の新規電源であれば、大規模集中電源、ベースロードも需要があると考えられる。この点核融合はグリッド適合性において再生可能エネルギーより有利であろう。核融合の近郊立地可能性は未知であるが、低いポテンシャルハザードを考えれば安全対策によっては可能性があり、長距離送電が不要であれば利点となる。未来の電力システムのシナリオ分析の多くは、電源における再生可能エネルギーの寄与は大きいとしている。電力会社などグリッド運営に責任のある運営母体にとってみれば、グリッド維持に必要な適正な、安定な電源構成のために投資する観点が必要となる。安定したベースロードと、自然条件による不安定分の補償には従来火力、水力発電が中心に使われているが、その代替として核融合を使うためには、ベースロード機能とともに日変動など再生可能電源特有の不安定性への対応が必要となる。

また途上国の人口密集地域の多くは水資源確保も問題で

あり、核融合プラントで海水淡水化技術が利用できれば、排熱が有効利用できる。これは火力や原子力でも可能であるが、太陽光や風力など、熱源を伴わない再生可能エネルギーにはない利点であり、やはり核融合導入に際してのインセンティブのひとつとなりうる。トリチウム汚染のない淡水を得るための技術開発が必要となる。

(3)未来社会への対応

世界的に見れば、今世紀中盤以降でもエネルギー需要としては燃料（特に輸送用）は電力よりも大きい。またエネルギーの需要は、工業用熱源などでも大きい。これらは現在ほぼ全量が化石資源でまかなわれており、未来の環境制約下のエネルギー供給としては電力よりも量的にも意義的にもより重要であると考えられる。電力は軽水炉原子力や再生可能エネルギー、水力などでも火力を代替可能であるが、燃料や熱の供給は困難であり、もし核融合が燃料や熱を供給できるのであれば、導入により強い理由が得られることになる。特に核融合への投資家が一次エネルギー資源確保と二次エネルギーの安定供給に責任のある国家や企業であるとすれば、エネルギーシステム全体の脱炭素化を総合的に考慮しなければならない。未来のエネルギーシステムとして、電力以外の燃料セクターにおいては長期的に化石燃料の市場が縮小し、水素市場が拡大すると考えられている。つまり、将来的に（化石資源を用いない）水素製造技術への先行投資には強いインセンティブが働く。また、工業開発に必要なエネルギー源の確保では、電力とともに熱の供給が不可欠であり、化石燃料以外には高温ガス炉以外に候補となる技術がない。水素製造では水蒸気電解、化学的水素生成反応の多くで 800 度以上の高温が必要であり、工業用熱源として現在コンビナートで供給されているのは、500℃ 以上のスチームが一般的である。核融合は、先進ブランケットの利用による高温発生能力と、水素など合成燃料製造への可能性が指摘されているが、技術的な開発はほとんどまだ行われていない。このような温度は再生可能エネルギーや軽水炉では得られないため核融合の選択・導入の理由になる。核融合による高効率水素製造プロセスの開発は、核融合の市場導入可能性を大きく高めるものといえることができる。

（小西哲之，飛田健次）

参考文献

- [1] 総合資源エネルギー調査会需給部会：2030年のエネルギー需給展望（答申）（2005）。（<http://www.meti.go.jp/report/data/g50328bj.html>）
- [2] 原子力委員会：原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画（1994）。（http://aec.jst.go.jp/jicst/NC/tyoki/tyoki_back.htm）
- [3] 原子力委員会：原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画（2000）。（<http://aec.jst.go.jp/jicst/NC/tyoki/tyoki1.htm>）
- [4] http://aec.jst.go.jp/jicst/NC/tyoki/tyoki_new.htm で情報入手可能
- [5] 森谷正規：政治は技術にどうかわってきたか，朝日新聞社（2004）。

5.3 市場性獲得を目指した炉心プラズマの展開

5.3.1 はじめに

核融合エネルギーの開発段階において、2050年までの優先課題は社会から利用可能なエネルギーと認められることであり、このためには技術的信頼性と安全・環境面での受容性に重きが置かれることになる。この章で扱うのは、市場獲得が本格化する2050年以降である。核分裂炉の変遷になぞらえれば、第2世代(PWR, BWR, CANDU 炉など)から第3世代(ABWR, AAP600など)への飛躍期である。この時期の核融合の課題は、コストダウンとエネルギー利用形態の多様化への対応である。この章では、特に、コストダウンに向けたプラズマの高性能化、すなわち、ベータ値の飛躍的な向上のための方策について述べる。

5.3.2 炉システムから見た高ベータ化の意義

従来、核融合動力プラントにおけるプラズマの経済性指標として、工学設計において制約となる第一壁中性子壁負荷がよく用いられてきた。今、簡単のため円形断面でアスペクト比が3のプラズマを想定して、プラズマ副半径の1.2倍の位置に第一壁がある炉を仮定した場合、第一壁中性子壁負荷は下式で表される。ただし、プラズマの温度は10 keV とした。

$$p_n = 0.6 \cdot a \cdot \beta^2 \cdot B_0^4 \text{ MW/m}^2. \quad (1)$$

ここで、 a 、 β および B_0 はそれぞれプラズマ副半径、トロイダルベータ値およびプラズマ軸上でのトロイダル磁場強度である。(1)式から読み取れることは、まず β および B_0 が低い状態、即ちプラズマの体積出力密度が低い状態で要求される中性子壁負荷を満足させようとすると装置サイズが巨大化し、経済性に逆行することである。ここでは核融合プラントの経済性の指標は取り敢えず炉本体重量でみた場合の重量出力密度として以下議論を進める。

装置の大型化を招かずにはなるべき中性子壁負荷を確保するにはプラズマの体積出力密度を高める必要がある。(1)式からベータ値およびトロイダル磁場強度の増加によりプラズマの体積出力密度を高めることができるが、磁場強度の増加はコイル重量の増加を伴い重量出力密度の増加効果が殺がれることになり、その定量的評価が重要となる。一方、ベータ値の増加で炉本体重量が増加することはないので、経済性の改善はベータ値の増加が不可欠という磁場核融合の古くて新しい課題に突き当たる。これに関する論文は枚挙にいとまがないほど報告されているが、ここではベータ値と発電原価を定量的に関係づけている文献として、Galambos[1]とOkano[2]の論文を挙げる。

核融合出力が3 GWのプラントを考えた場合、ベータ値の高低が炉本体重量にどう影響するかを示したのがFig. 2である。中性子壁負荷 P_n については将来的にも除熱等の工学的な許容限度と考えられている5 MW/m²を取り上げた。ブランケット、遮蔽体等の炉心部重量は中性子壁負荷 P_n と反比例の関係にある。仮に $P_n = 1 \text{ MW/m}^2$ で $\beta \sim 1\%$ の場合、ブランケット、遮蔽体等の炉心部が大型化することに重ねて強磁場ゆえのコイル重量の増加が相乗され、炉本

Fig. 2 Estimation of tokamak reactor weight for various β values. The weight in shade ($\sim 5,000 \text{ t}$) corresponds to the primary system of LWR.

体重量は約45,000トンとなり軽水炉一次系のほぼ10倍にも達する。低ベータ($\beta \sim 1\%$)では中性子壁負荷を高く($P_n = 5 \text{ MW/m}^2$)しても、そのしわ寄せがトロイダルコイルに集まり、炉本体重量約25,000トンの8割近くがトロイダルコイル重量で占められることになる。問題の所在を明らかにするためにベータ値が無限大の仮想核融合の重量評価もFig. 2に示した。これは磁場核融合でありながらコイル系機器を排除したことになり、炉本体重量は中性子壁負荷のみによって決まるブランケット、遮蔽体等の炉心部重量と等しくなる。参考のため軽水炉一次系の重量(5,000トン)をハッチングで同図に示してあるが、 $P_n = 5 \text{ MW/m}^2$ の仮想核融合でも軽水炉一次系の重量より多少軽量であるに過ぎず、核融合が軽水炉並みの市場性を獲得することが容易でないことが見てとれる。

一方、ベータの依存性については、 $\beta \sim 1\%$ から $\beta \sim 10\%$ に増加することで炉本体重量は激減し、その絶対値も軽水炉の2倍程度にまで下がる。これをもって軽水炉との経済競争性云々を即断できないにしても、 $\beta \sim 10\%$ 程度は将来の磁場核融合プラントとして望みたいところである。現在設計されている通常のコイル系実用プラントでは $\beta \sim 5\%$ 程度が到達可能な値として認められており、希望値とは倍以上の隔たりがある。

5.3.3 低アスペクト比による高ベータ化

(1)概要

トカマクプラズマのベータ限界値 β_c は、Troyon等の半理論的考察によって下式として示された[3]。

$$\beta_c (\%) = \beta_N \frac{I_p (\text{MA})}{a (\text{m}) B_0 (\text{T})}. \quad (2)$$

ここで、 β_N および I_p は、それぞれ、規格化ベータ値及びプラズマ電流である。この式は、保持可能なプラズマ圧力は磁気圧 ($B_0^2/2\mu_0$) と弱磁場側の磁力線の連結長 ($\sim B_0/B_p$) で決まるという考え方に基づいている。当初、Peng らは Fig. 3 に示すように低アスペクト比 ($A \sim 1.5$) プラズマの磁力線構造の特徴に注目して、MHD 安全係数 q_ψ 値を下げることなくプラズマ電流値を増加させることでベータ限界値の改善が可能であることを提唱した[4]。即ち(2)式右辺分数表示部の増加である。特徴的磁力線構造は、図中の右側に示すようにアスペクト比が低い程トラス内外でのトロイダル磁場の強弱の差が大きいことであり、この結果トラス内側と外側では磁力線のピッチが大きく変化し、全体で平均すると高い q_ψ 値が確保されるためである。この特徴的磁力線構造効果のみで、即ち規格化ベータ値 β_N のアスペクト比依存性を期待しなくても(80年代半ば当時、この依存性はよくわからなかった)、 $\beta_c \sim 20\%$ が期待できるとあって中性子遮蔽の不要な銅導体のトロイダル磁場コイルを用いた小型自己点火装置あるいは材料照射プラントの構想がなされた[4, 5]。

その後の実験の進展により、低アスペクト比領域では比較的容易に高 β_N を得られることが明らかにされるようになった。MA 級の低アスペクト装置 NSTX (プリンストン大学) の最近の実験では $A = 1.4$, x 点での楕円度 $\kappa_x = 2.0$ および三角度 $\delta_x = 0.8$ の条件で、瞬間値ではあるが、 $\beta = 39\%$ ($\beta_N \sim 6$) を得ている[6]。シミュレーションによる研究もなされ、Miller はアスペクト比、 $1.2 < A < 3.0$ の領域でバルーニングモード ($n = \infty$) に対して安定なブートストラップ電流割合 0.99 の MHD 平衡の形状依存性を調べている[7]。 β は三角度 $\delta = 0.4$ 付近で最大となる。この場合、壁安定化シェルの位置は $r_w/a = 1.15$ 程度に近接していることが必要であるが、 $\delta = 0.5$ と高三角度になればシェルの位置は $r_w/a = 1.3$ 程度まで緩和される。ここで、 r_w はプラズマ軸からシェル位置までの距離である。低アスペクト比では高い楕円度 k を得やすいという性質を考慮に入れるため、この研究は、ベータ限界の κ および A 依存性に関する研究に発展した[8]。Miller の研究を核融合装置および核融合プラント設計に活用するための $\beta_N(A, \kappa)$ の定式化が Wong によって試みられ[9]、その後、Lin-Liu らが継承発展させ、 $A = 1.2 - 7.0$, $\kappa = 1.5 - 6.0$ という広範囲に適用可能な β_N の式を提案した[10]。文献[9]で与えられる κ を用いて文献[10]の β_N をアスペクト比 (A) 依存性としてグラフ表示したものが Fig. 4 である。低 A ほど、 κ および β_N が上昇する様子が窺える。

これら一連の定式化は、ブートストラップ電流比 0.99 という自律性の高いプラズマを対象としており、ベータ最大化に必ずしも好都合の電流分布を前提としていない。実際の設計においては能動制御の余地を確保するため、ブートストラップ電流比は 0.8 前後の値が選ばれる。従って、次節 5.3.4 にて詳述するようにプラズマ電流分布および圧力分布の高度な制御の可能性が出てきて、更なる高 β_N も期待できる。

実際の設計で用いる κ および β_N は、現実的なシェル構

Fig. 3 Schematic drawing of field lines on magnetic surface for high and low aspect ratio configurations.

Fig. 4 Dependence of achievable k and β_N on A

造に基づきプラズマ電流分布および圧力分布の制御性を考慮して決定されることになる。

高 β_N の定常維持を図る上で考慮すべきことは、新古典ティアリリングモード (NTM) の安定化と抵抗性壁モード (RWM) の安定化である。NTM モードが出現する β_N については現在研究中であり、低 A の効果についてもわかっていないのが実状である。他方、RWM であるが、たとえ β_N 上限を高くすることが可能であっても、そこに到達するまでに高次 (短波長) の RWM まで安定化が求められるようではその効能を活かせない。Fig. 5 は、MARG 2D コードによって得られた理想 MHD モードの安定性によって制限される β_N 上限を示している[11]。ここでは各 MHD 平衡の最外殻磁気面の形状 ($\kappa = 1.8$, $\delta = 0.45$) および安全係数・圧力の各分布を拘束条件としてアスペクト比を変化させている。この図から、短波長の理想 MHD モードを安定化できない場合であっても、低 A ほど高い β_N 上限を持つこと

Fig. 5 Dependence of achievable β_N on the conducting wall position (r_w/a) in $A=2.44, 3.26$ and 4.2 cases

が見て取れる。さらに、低 A では安定化壁が無しの場合 ($r_w/a \rightarrow \infty$) の β_N 上限が高いことがわかる。このことは、低 A は β_N 出発点に関して既に下駄を履いており、RWM 安定化によるベータ向上を図る上で優位にあることを意味する。

なお、Fig. 5 の計算は上記の拘束条件のもとで β_N 上限のアスペクト比依存性を示しているが、電流分布や圧力分布をそれぞれのアスペクト比を持つ平衡に対して最適化することにより、より高い β_N 上限を達成し得ることは先に述べたとおりである。完全導体壁ではなく、抵抗性壁および RWM の安定化を行うための制御コイルを配置した場合に到達できる β_N 上限のアスペクト比依存性についての理論的・数値的な解析は今後の課題である。

(2)設計例

何れにせよ先に述べた低アスペクト比プラズマの特徴的な磁力線構造がもたらすプラズマ電流値の増加によるベータ限界値の改善効果[2]を大幅に上回ることが明らかになって以来、材料照射プラントあるいは核分裂・核融合ハイブリッドプラントに留まらず発電用動力プラントの設計気運が高まってきた。具体的なプラント概念の構想にあたっては、トロイダルコイルを常伝導あるいは超伝導とするかという大きな選択肢がある。常伝導コイルプラントの方は、遮蔽体が薄いのでより低アスペクト比の高性能プラズマが得られることの利点と、軸上磁場が弱いため装置の大型化が避けられないことおよびコイル導体でのジュール損失の欠点の得失如何に掛かっている。一方、超伝導コイルプラントの方は、コイル導体でのジュール損失が無いことおよび強磁場が得られることの長所が、相対的に厚くなるであろう遮蔽体設置によってアスペクト比が高くなることの短所を補うことができるか否かに掛かっている。いずれのアプローチも低アスペクトを指向するため、中心ソ

レノイドコイル (CS コイル) の排除あるいは可能な限りのスリム化を指向することになる。これは将来の発電用動力プラントは定常運転が前提とされており、CS コイルが必要不可欠の機器でなくなる可能性があるためである。

常伝導コイルプラントの本格的な設計例として ARIES-ST[12] が存在するが、やはりジュール損失のペナルティが大きく、アスペクト比 $A=1.6$ という低さにもかかわらず、実効的な重量出力密度は従来のトカマクプラントより下がる結果になっている (Fig. 6 参照)。発電単価も 30% 程度も高くなっている。ただし、常伝導コイルプラントは技術的に容易であることから、近未来の大規模中性子源としての可能性は、従来から指摘されているとおりである。

超伝導コイルプラントの代表的設計例としては VECTOR[13]がある。VECTOR では、厚さ 1 m 近い遮蔽体設置のためアスペクト比 $A=2.3$ と若干高めではあるが、ジュール損失が無いことおよび強磁場が得られることの長所が幾らか低下するベータ値を十分補う設計となっており、Fig. 6 に示すように炉本体重量でみた場合の重量出力密度は従来比で 2～3 倍改善されている。

VECTOR は将来的には軽水炉と経済的に競合し得ることを念頭におき、工学的にも将来の技術開発目標を与えることを念頭に置いて設計されたものである。その代表的なものは高温強磁場超伝導のトロイダルコイルである。最大磁場は 20 T 程度を想定しているが、CS コイルを排除しているため、強磁場にもかかわらず蓄積エネルギーは過大なものにはなっておらずコイル重量は比較的軽量に収まっている。建設コストに直結するトロイダルコイルの重量 (支持構造物を含む) はその蓄積エネルギーとはほぼ比例関係にある。蓄積エネルギーはコイルの幾何形状と磁場強度に依存し、最大磁場の値とその径方向位置 (R 座標) の積の 2 乗で概ね決まる。ITER では最大磁場 11.8 T でその R 座標は 2.8 m であり、蓄積エネルギーは 44 GJ、コイル重量は約 5,000 トンに達する。一方、強磁場プラントではあるが、低アスペクト比の VECTOR では、最大磁場が 20 T でその R 座標は 0.85 m である。 R が小さいことにより、蓄積エネルギーはわずか 10 GJ でコイル重量は約 1,200 トンと ITER の 4 分の 1 に過ぎない。このようなトロイダルコイルの軽量化は、VECTOR 炉重量の軽量化に繋がっている。

ブランケット等の保守方式にかかわる炉構造概念も低アスペクト比の特徴を活かしたもとなっており、ITER とは

Fig. 6 Reactor weight and weight power density of VECTOR in comparison with conventional tokamak reactors

Fig. 7 Schematic reactor configuration for low-A reactor. Low-A is favorable for sector transport / hot cell maintenance.

大きく異なる。ITER 等で採用されている小モジュール化による炉内保守に対して VECTOR ではセクター一括交換によるホットセル保守を採用している。一般に、セクター一括交換ではトロイダルコイルボアが大きくなる傾向にある。しかし、アスペクト比の小さい炉形態では以下の2点の理由により、この傾向は緩和される。第一は、一定の距離を保った2つの同心円は半径が小さくなるほど、両者の円周の比が大きくなることによる。第二は、前述したようにトロイダルコイルが細身であることによる。この方式を模式的に示したのが Fig. 7 である。

低 A 化は、高ベータ化の一方策にとどまらず、トロイダルコイルの軽量化による建設コストの削減およびセクター一括交換保守の採用による稼働率向上といった、高経済性に繋がる複数の特長があることを強調しておきたい。

5.3.4 分布制御による高ベータ化

分布制御による高性能トカマクの先駆的研究としては、小関らによる高ブートストラップ電流と整合するホローな電流分布をもつ高性能プラズマ ($\beta_N \sim 3.0$) の提案[14]、さらには Kessel らによる分布の最適化による高ベータ運転シナリオ ($\beta_N \sim 5.0$) の提示がある[15]。また、実験的にもホローな電流分布の潜在能力を暗示する結果が得られていた[16]。これらの研究がきっかけとなり、分布制御を必要とする高性能負磁気シアプラズマとして実験的に実証され[17,18]、炉設計研究にも反映されることになった[19,20]。

高性能負磁気シアプラズマの MHD の観点からみた制御指針としては、①広い負磁気シア領域によりバルーニングモードの安定化、②バルーニングモード安定領域への最大圧力勾配の位置制御、③ q_{min} 領域でのキンクモード安定化用導体壁の設置、④ q_{min} の位置制御と有理面を避ける値の4点があげられる (Fig. 8)。

Fig. 8 Basic concept for high beta plasmas due to the plasma profile control.

負磁気シア放電の最大の利点は①に示すバルーニングモードの安定化にある[21]。したがって、この領域を広くし②で示した最大圧力勾配の位置がこの領域に入るように分布制御することにより高ベータが可能になってくる。しかし、高ベータになると最大圧力勾配が存在する q_{min} 領域周辺でキンクモードが不安定となるため[22]、③に示す安定化導体壁の設置が必須となる。最後に①で言及した負磁気シア領域の拡大、ならびに③で言及した導体壁の効果的な安定効果のために q_{min} の位置をできるだけプラズマ周辺に制御するとともに、できるだけ有理面を避けるため q_{min} の値を大きくすることが望ましい。これらの MHD 制御による最適化により高ベータプラズマが得られ、高ブートストラップ電流も可能になってくる。もちろん、最終的には ECCD 等による NTM の安定化、制御コイルやプラズマ回転による RWM の安定化を考慮する必要がある。NTM 抑制手法は実証済みであり[23]、ITER 等の制御指針等も理解されつつある[24]。RWM に関しても抑制手法が提案されつつあり[25]、これらは ITER において燃焼プラズマに対する実証研究が行われると考えられる。しかしながら、動力プラントにおける RWM 抑制については、厳しい中性子照射環境下への制御コイルの設置や炉内機器との干渉などの技術的困難を克服しなければならない。

次に考えなければならないことは MHD 制御と電流分布制御の関係、つまり、MHD 的に安定な圧力分布から決まるブートストラップ電流分布をベースに、設定しているプラズマ電流分布（安全係数分布）を形成できるかどうかである。それが NBI や RF による電流駆動を駆使して理論的に可能だとしても、技術的に妥当な値であるか(例えば、電流駆動パワーが大きすぎないか、NBI ビームエネルギーが大きすぎないか等々)まで考える必要がある。

最後に残された制御課題がプラズマ輸送現象との整合性である。ここまで考えてきた圧力分布やブートストラップ電流分布はプラズマの輸送現象に支配されている。したがって、MHD 解析から得られた各種分布がプラズマ輸送現象と合致している必要がある。例えば、一般的にこの負磁気シアプラズマでは q_{min} 領域に内部輸送障壁 (ITB) が形成されるが、その形成位置と圧力勾配の値が MHD から

Fig. 9 Measured (solid) and target profiles (broken) for q, l and ρ_{Te}^* after projection on the set of basis functions, for pulse #62156. for ρ_{Te}^* , the original profile has also been plotted (dotted). Each column corresponds to one time, respectively, $t = 5.5$ s (start of control), $t = 8$ s and $t = 10.25$ s (end of control)[27].

決まったものと整合性がとれているかが問題となる。

ここまでの議論にあるように分布制御による高ベータ化のためには、MHD 特性、電流分布制御特性、輸送特性の3つの観点に関して整合性の取れた分布制御を行う必要がある。このような3つの観点から整合性の取れた分布制御にとって、プラズマ分布の統合的な実時間制御手法の開発は必須と考えられる。電流分布制御に関しては、電流駆動手法がいくつか存在するため、ある程度柔軟性のある制御が可能であると予測されるが、当然ながら電流駆動装置性能

について考慮されなければならない。例えば、岡野らによる NBI 電流駆動解析の結果、NBI のビームエネルギーが分布制御の柔軟性に大きく影響を与えることが指摘されている[26]。圧力分布制御に至っては、未だ輸送原理が明確でないこともあり多くの研究課題が残されていると考えられる。ここでは最後に実時間プラズマ分布制御手法の開発現状についてまとめ、分布制御による高ベータ化の今後の展望について概観する。

分布制御技術は ITER における高性能定常プラズマ運転シナリオにても当然必要な制御技術であり、ITER の実験を見据え各極で精力的に研究が進められつつある。JET では NBI, ICRH, LHCD の3つを制御ツールとして電流分布、温度（圧力）分布の実時間制御を目指した実験を開始している。Fig. 9 に示すように制御開始直後 ($t = 5.50$ s) には安全係数分布に大きな違いがあるものの、10.25秒後には目標とする安全係数分布が得られている[27]。それと同時に、温度勾配を示す無次元数 $\rho_T^* (= \rho_s/L_T)$ も $x = 0.5$ 領域にある目標値に近い値が得られているのがわかる。JET では $\rho_T^* > \rho_{ITB}^* \sim 1.4 \times 10^{-2}$ を満たす位置に ITB が形成されるという経験則を用いて ITB 制御を行っており[28], $t = 5.50$ s には ITB の位置 (ρ_T^* の最大値の x に対応) が $x = 0.4$ 近傍にあったものが $t = 10.25$ s には目標領域 $x = 0.5$ への ITB 位置制御に成功している。さらに別の実験では、制御中に輸送障壁の形成や MHD 現象による擾乱が起こった場合にも問題無く目標分布を得ることに成功している[27]。これら一連の制御では、NBI, ICRH が加熱、LHCD が電流駆動の役目を主に果している。

JT-60U では、プラズマ回転の制御や加熱分布制御により内部輸送障壁の圧力勾配が制御可能であることを実証している[29]。Fig. 10 に NBI を用いたプラズマ回転による制御例を示す。ここでは、NBI 入射方向を変え (BAL $\Rightarrow$ CO $\Rightarrow$ CTR $\Rightarrow$ BAL) プラズマ回転分布を変えることで閉じ込め

Fig. 10 (a) Time evolution of T_i gradient with the combination of NB. (b) Momentum source profiles in the different directions of toroidal momentum injection. Profiles of (c) ion temperature and (d) toroidal rotation velocity in the active ITB control discharge by changing the direction of toroidal momentum injection[29].

改善の支配パラメータと考えられている径電場 E_r を通して、温度勾配の制御が可能であることを実証している。しかしながら、一般的に将来の核融合プラントではNBI加熱パワーはできるだけ小さく設計されるため、十分なプラズマ回転トルクが得られずこのような回転を通した分布制御は困難と考えられる。この制御方法を利用するためにはCRESTのように小型装置でかつ比較的大きなNBI入射が必要となるであろう[20]。

ITB位置制御に関しては、JT-60Uにおいて $q_{\min}$ の位置をプラズマ周辺部に制御することによるITBのプラズマ周辺部への位置制御の可能性も示唆している[29]。また、C-Modにおいても系統的に調べられており、ITBの位置を q_{95} 値（もしくは磁場や電流値）により制御可能なのではという提案がなされている[30]。

この節では分布制御による高ベータ化に関して、基本コンセプトならびに、その研究課題と研究の現状について簡単にまとめた。分布制御の現状としてはITER計画を念頭に入れ研究が始められたばかりであるが、JETにおける安全係数分布、温度勾配ならびにITB位置の実時間同時制御、JT-60Uにおけるプラズマ回転分布・加熱分布制御によるITBの温度勾配制御、JT-60UやC-Modで得られたITBの位置制御に向けた知見等々、分布制御による高ベータ化へ向けた物理課題が着実に理解されつつあるとともに、制御に必要な要素技術の開発・実証も行われている。将来これらの要素技術はITER計画における高性能定常運転実現のために用いられることになる。そのITERでの実験を通して分布制御精度・適用可能範囲等を詳しく調べることで、CRESTやARIES-ATに代表される分布制御による高性能プラズマの潜在能力を最大限利用した実用炉の実現性が明らかになると考えられる。

5.3.5 おわりに

ここ10年間の炉心プラズマ高性能化の主要因は分布制御にあるが、この制御性という点で言えば従来の実験装置と核融合動力プラントとの間には極めて大きなギャップがあることは広く認識されている。核融合プラントにおける主要な分布制御ノブとされる電流および粒子補給の効果は限定的であり、分布の行き先をプラズマの自律性に委ねるのが基本的な考え方になるだろう。しかしながら、この限定的な制御ノブを利用してプラズマの自律性に働きかけ、プラズマ自身に内在する高経済性に繋がる潜在能力を引き出せる可能性も十分ある。このような分布制御はITER以降の炉心プラズマの研究の中心的課題である。他方、低アスペクト比化は、炉設計として扱う（不確定性の少ない）高ベータ化の一方策として提案されているわけであるが、この場合でもある程度の分布制御は不可欠である。低アスペクト比の大きな問題は実験データの不足である。しかし、現時点での物理的基盤が不十分ではあっても低アスペクト比には市場獲得を実現していける可能性が明確にあり、今後の炉心プラズマ研究の強いインセンティブになりうることを本稿のメッセージとしたい。

（西尾 敏，日渡良爾，飛田健次）

参考文献

- [1] J.D. Galambos *et al.*, Nucl. Fusion **35**, 551 (1995).
- [2] K. Okano *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **72**, 365 (1996).
- [3] F. Troyon *et al.*, Plasma Phys. **26**, 209 (1984).
- [4] Y.-K.M. Peng *et al.*, Fusion Technol. **8**, 338 (1985).
- [5] M.A. Abdou *et al.*, Fusion Technol. **26**, 1 (1995).
- [6] J.E. Menard *et al.*, Nucl. Fusion **43**, 330 (2003).
- [7] R.L. Miller *et al.*, Phys. Plasma **4**, 1062 (1997).
- [8] R.L. Miller *et al.*, International School Plasma Physics 17, (1996) p.11.
- [9] C.P.C. Wong *et al.*, Fusion Eng. and Des. **51-52**, 387 (2000).
- [10] Y.R. Lin-Liu and R.D. Stambaugh, Nucl. Fusion **44**, 548 (2004).
- [11] N. Aiba, S. Tokuda and T. Ishizawa, Submitted to J. Plasma Phys. (*Proceedings of 19th ICNSP and 7th APPTC in Nara*, 2005).
- [12] F. Najimabadi *et al.*, 17th IAEA Fusion Energy Conf., Yokohama, IAEA-CN-69/FTP/8 (1998).
- [13] S. Nishio *et al.*, 20th IAEA Fusion Energy Conf., Vilamoura, IAEA-CN-FT/P7-35 (2004).
- [14] T. Ozeki *et al.*, Proc. 14th Int. Conf. of Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Wurzburg, IAEA-CN-56/D-4-1 (1992).
- [15] C. Kessel *et al.*, Phys. Rev. Lett. **72**, 1212 (1994).
- [16] E.A. Lazarus *et al.*, Phys. Fluids **B4**, 3644 (1992).
- [17] F.M. Levinton *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75**, 4417 (1995).
- [18] E.J. Strait *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75**, 4421 (1995).
- [19] F. Najimabadi *et al.*, Proc. 18th IAEA Fusion Energy Conf., Sorrento, IAEA-CN-77/FTP2/15 (2000).
- [20] K. Okano *et al.*, Nucl. Fusion **40**, 635 (2000).
- [21] A. Sykes *et al.*, Phys. Rev. Lett. **39**, 757 (1977).
- [22] T. Ozeki *et al.*, Nucl. Fusion **33**, 1025 (1993).
- [23] A. Isayama *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **42**, L37 (2000).
- [24] N. Hayashi *et al.*, Nucl. Fusion **44**, 477 (2004).
- [25] M. Okabayashi *et al.*, Proc. 20th IAEA Fusion Energy Conf., Vilamoura, IAEA-CN-116/EX/3-1Ra (2004).
- [26] K. Okano *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **80**, 241 (2004).
- [27] L. Laborde *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **47**, 115 (2005).
- [28] G. Tresset *et al.*, Nucl. Fusion **42**, 520 (2002).
- [29] Y. Sakamoto *et al.*, Proc. 18th IAEA Fusion Energy Conf., Sorrento, IAEA-CN-77/EX6/4 (2000).
- [30] C.L. Fiore *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **46**, B281 (2004).

5.4 市場性獲得を目指した工学開発

5.4.1 ブランケットの高温化

5.2節では初期の数基の核融合プラントの導入に必要な要件について考察し、必ずしも発電コストが一義的に導入可能性を左右するものではないこと、社会の要求、将来的な見通しが重要であることを指摘した。本節の課題は、核融合が導入された後のエネルギー市場でのシェア拡大が課題であり、ここではコスト競争はより重要性を帯びてくる。原子力導入の歴史でも、当初はガス炉、黒鉛炉などが導入され、最終的に軽水炉がほぼ独占に至ったように、こ

の過程での大きな変化は十分ありうることだし、またそのときの社会情勢に影響され、予測はきわめて困難である。とはいえ導入時に期待される特徴はその後も重要であり、エネルギー市場への対応で選択が行われるので、ブランケット、利用系(従来、いわゆる BOP-バランスオブプラントといわれている部分に含まれる)がポイントであることは技術的には変わらない。特に本格的にコストが大きく影響するような技術段階では、相対的に核融合固有の炉心機器のコストの占める割合は相対的に低くなっていなければ本来他電源と競合可能になっていないはずである。核分裂では市場選択の過程で炉型が変わったが、核融合ではブランケットが燃料(主にリチウム)、エネルギー(ガス/水、温度)の出入りを決めているので、その影響が大きい。

核融合の市場性の拡大のポイントになるのはブランケット高温化と発電技術と考えられる。未来の火力プラントの発電技術は、天然ガスを燃焼し、高温ガスタービンと、その廃熱でさらにスチームタービンを駆動するコンバインドサイクル、あるいは IGCC と呼ばれる石炭ガス化コンバインドサイクルが考えられており、60%ないしそれ以上の熱効率も見込まれる。これを代替していこうというのであれば、核融合も類似の熱のカスケード利用に基づく発電技術体系への対応が有利であろう。すなわち900度帯のガスタービン、超臨界ないしスーパーヒート蒸気タービンの利用が可能であれば、それを可能とする高温ブランケットを開発することによって市場性を高めることができる。

これには火力発電のリパワリングが参考になることを岡野が指摘している[1]。すなわち、旧式の石炭火力発電プラントは比較的温度の低い蒸気タービンを駆動するが、これに天然ガスタービンを加え、古いボイラをその廃熱ボイラとして、プラントを天然ガスタービンと廃熱タービンによるコンバインドサイクルに転換することで、古い資産を生かしつつ出力増加を行うものである。このアナロジーとして、核融合炉心を全面交換するのではなく、当初300度程度の軽水冷却で導入した核融合プラントのブランケット交換に際して、高温高性能ブランケットに交換することでこのリパワリングは行うことができる。核融合炉では多くの設計でブランケットや炉内機器を定期的に交換しなければならないが、これは長期にわたって使用する大型プラントでは、漸進的な性能向上や長期信頼性の確保、市場の要求変化への対応の点で有利となる可能性がある。この特性を生かすためにも、のちに述べるブランケット交換メカニズムは市場性向上において重要な機能を持っている。ブランケット構造の大幅な変更、極端な場合熱媒体の変更などにも対応しうるためである。同様に、大幅なブランケットと熱利用系の変更の可能性は、当初発電専用で開発した核融合プラントでも、将来的に水素製造や他の熱利用に転用できることを意味している。

5.4.2 高温化と水素製造技術への対応

5.2節で述べたように、市場シェア拡大で重要なのは化石エネルギーを代替することであり、これによって二酸化炭素放出が削減される。原子力との市場競合で勝っても、

二酸化炭素放出は減らないし、現在の原子力への研究開発投資の効果を減ずることになるので、市場性向上のための開発といっても、原子力の市場を狙ったのでは意味はない。この観点で、ブランケットから得られる熱の高温化は市場性向上のための重要な技術である。

現在考えられている高温高性能ブランケット概念は、低放射化フェライトマルテンサイト鋼(RAFM)や ODS 鋼を材料とする超臨界水温度帯、バナジウム合金を使用する700℃帯、SiC 複合材を利用する900℃超がある。特に、SiC-LiPb の組み合わせは、各極で最も経済的な核融合プラント概念に採用される[2-5]一方、現在、ITER の TBM の概念の中で、当初は RAFM を用いて初期から試験を開始しながらも、dual coolant 概念により段階的に SiC 材を導入して高温化を行うという開発戦略が考えられており、比較的实现性の高い組み合わせとして興味深い。

高温が得られたとして、それを利用した水素製造プロセスとのインターフェースも重要な技術課題となる。将来重要な発電技術となる可能性のある燃料電池でも、SOFC と呼ばれる固体電解質を用いる技術は900℃超の高温が必要であるが、本質的に可逆で水蒸気電解と共通の技術である。核融合プラントの高温ブランケットにより熱と電力を同時に供給して高効率で水素製造を行う一方、SOFC 発電との結合も可能である。このほかにも、高温ガス炉利用系として開発されている IS プロセスなどの水の熱化学的分解、筆者らの提案するバイオマスからの熱化学的水素製造[6]などが利用可能であり、これらとの組み合わせの技術的可能性を示すことが市場性拡大のためには大きな効果を及ぼすことが期待される。

5.4.3 ブランケット交換と遠隔保守の開発戦略

動力プラントクラスのトカマク炉は数 MW 程度の中性子壁負荷が想定される。これは現在想定される耐中性子照射特性の最も優れた構造材料を用いたブランケットでも数年毎に交換が必要となることを意味する。同じ原子力プラントでも現在稼働中の軽水炉の保守性に比べてトカマク炉のそれは格段に困難さが増すであろうと指摘されている。これはプラントの高稼働率の阻害要因であり、看過できるものではない。これまでのトカマク炉の設計研究で明らかにされた保守性の困難要因は以下の3項目に大別される。

(1) プラズマディスラプションによる強大な電磁力

交換機器の支持条件は容易な着脱性と強固な固定力が同時に求められる。一方、トリチウム増殖機能の向上はブランケット筐体強度と相反する関係にある。

(2) 保守時の高誘導放射線環境

保守機器の部品の多くは高誘導放射線環境下では使用不能もしくは極めて短寿命である。特に半導体機器の導入は絶望的であるため炉内での複雑な保守作業は期待できない。

(3) 狭隘な作業環境

炉内はブランケット、遮蔽体、ダイバータ等が共通の真空境界内に設置されており、それぞれ独立した配管系を有する。狭隘な作業環境でありながら複雑な作業手順

Fig. 11 Reactor Configurations for In-situ Maintenance and Hot Cell Maintenance. (A) In-situ Maintenance, (B) Hot Cell maintenance.

を避けることの可否が問われる。

定期交換されるブランケット等の保守方式はITER等で採用されている炉内保守方式と従来から実験炉以降の動力炉で採用されているホットセル保守方式の2種類に大別される。先にあげた保守性の困難要因がこれら保守方式に差にどんな形で顕れてくるかを考えてみる。

炉内保守方式では交換される機器は細分化(1~2mのピース)された構造となり、マニピュレータアーム等で着脱、搬入、搬出される。電磁力に耐える強固な支持機構を狭隘な作業空間で短時間に着脱できるか否かが鍵となる。また細分化されたすべてのピースに取り付けられている配管系に対し、10回以上に及ぶ切断、再溶接が必要となり、その信頼性、迅速性も成立性の鍵を握る。さらに、放射化した炉内での長時間作業であるから、保守機器の構成部品には耐放射線特性に優れた材料が求められ、それらの開発も不可欠である。細分化されたピースなので搬重量は軽量で、搬入および搬出に必要な開口部サイズも小さくて済むことが特徴である。

一方、ホットセル保守方式(セクター一括引抜方式ともいう)は、ブランケット、遮蔽体およびダイバート等で構成するトラス構造体をトロイダルコイルの数と同数のセクター状(放射状)に分割し、それぞれを隣接トロイダル

コイルの間から一括して水平方向に出し入れし、細かい作業は空間的制約のないホットセルにて行う方式である。この方式はトロイダルコイルと干渉することなく各セクターを出し入れするためにトロイダルコイルボアは大きくなる傾向にある。ただし、アスペクト比の小さい炉形態では以下の2点の理由により、この傾向は緩和される。第一は、一定の距離を保った2つの同心円は半径が小さくなるほど、両者の円周の比が大きくなることによる。第二は、アスペクト比の小さい炉形態ではトロイダルコイルが細身であることによる。両者の概念図をFig. 11に示す。保守の専門家Waganerは両者を定量比較し、80点満点で炉内方式は39点、ホットセル方式は69点と採点し、後者の卓越性を指摘している[7]。

5.4.4 超伝導コイルの高温超伝導材による進歩

本誌の講座「核融合と超伝導工学」での高畑の解説記事は簡にして要を得たものである[8]。そこでは現状の核融合用超伝導コイルの工学的特徴がわかりやすくまとめられており、将来の技術課題についての示唆もなされている。特に開発の困難さは超伝導線材自身の開発(例えば、高磁界化、高温化など)よりもむしろ磁気エネルギーの増大化即ちシステム全体の巨大化あるいはシステムの品質管理が開発上の隘路になり得る、という指摘は炉の設計者にとって銘記すべきかと思う。特に炉本体重量のうちコイル重量が過半を占め、そのコイル重量の大部分が構造材(強度部材)によって占められている点は肝に銘じて置く必要がありそうである。ここでは炉設計の立場から超伝導コイルの工学的課題を冷却方式、運転温度および超伝導線材に分けて述べてみる。

冷却方式は浸漬冷却、強制冷却および伝導(間接)冷却に分類でき、それぞれの特徴を以下に述べる。

浸漬冷却: 構造が単純なため巻線および接続が容易で高度な製造技術を必要としない。除熱性および低温熱容量が高いため、熱擾乱に対する冷却安定性は高い。ただし各導体間にはスペーサーが挿入されているのみで、また巻き上げられた導体全体はヘリウム容器の中にスペーサーで固定されているのみであるため機械的強度が著しく劣り、層間、対地間共に高い絶縁性能が期待できない。強大な電磁力およびクエンチ時の高い誘起電圧が避けられない核融合用コイルで浸漬冷却が主流になることはない。

強制冷却: この冷却方式の代表的構造がケーブル・イン・コンジットと呼ばれ、撚りあわされた超伝導ケーブルが鋼鉄製の管(コンジット)に収納され、管内の隙間に高圧ヘリウムを強制的に流す構造である。低温で熱容量の高いヘリウムが超伝導ケーブルの近傍にあるため除熱性に優れ、熱擾乱に対する冷却安定性は高い。コンジットは電磁力支持の優れた構造材として機能し、導体全体は絶縁層で覆われるため高い耐電圧特性を有する。ただし、電流流路と冷媒流路が同居

しているためコイル構造に制約が課せられる。また、冷媒の圧力損失のため導体長の制限あるいは冷媒出入りが多数存在することになりコイル周りが煩雑になる。これはシステムの信頼性あるいは保守性を低下させる要因となる。

伝導冷却：基本構造は先のケーブル・イン・コンジット方式から冷媒のヘリウムを排除したものである。コンジット内に隙間がなくなったので機械的強度は一層向上する。導体を束ねたディスク構造を媒介した冷却であるため間接冷却とも呼ばれる。低温熱容量の高いヘリウムが導体近傍にないため、伝導冷却の即応性如何によっては瞬時に20 K程度にまで昇温する。電流流路と冷媒流路が独立しているためコイル構造の設計自由度が高い。

上記冷却方式のうち伝導（間接）冷却が核融合用超伝導コイルにとって好ましいことは論を待たない。ところが ~ 4 Kの低温運転での熱擾乱に対する冷却安定性が劣ることについては先に述べたとおりである。そこで安定化材を含めた導体自身の熱容量が高くなる20 K近傍での運転が望まれることになる。高温超伝導線材への渴望である。この場合、高温運転による冷凍機容量の低減も期待できるがそれは副次的なものに過ぎない。将来的には高磁場の要求と相まって高温超伝導と伝導冷却（間接冷却）の組み合わせが主流になると考えられるが、開発の過渡段階では他の組み合わせもあり得る。例えば、低温超伝導と伝導冷却である。熱擾乱により瞬時に20 K程度にまで昇温する可能性は否定できないが、問題は再び ~ 4 Kの低温域まで冷却するに要する時間である。必ずしも高い稼働率が要求されることのない発電実証プラント段階では考慮の対象になるであろう。

5.4.5 安全性とトリチウムの問題

安全性は、一旦導入されれば大きな課題はないと思われがちであるし、また導入の必要条件にはなっても、安全性がさらに向上したからといって市場性が増すというものでもない。しかし実は、市場性拡大のためには広範な安全適合性が重要となる可能性がある。たとえば現在の原子力発電は、社会受容性とあいまって、立地可能地点が極めて限定されるという特性が市場性の大きな制約となっている。このため、環境対策上必要性が強く認識されながらも、急速な増加はほとんど予想されていないのである。核融合プラントについても、立地の自由度、免震など立地条件を緩和するような安全確保技術は市場性の向上では重要な意味を持っている。この意味で、ITERで免震技術が採用されたことの意義はきわめて大きい。

さらに、核融合プラントは反応度事故（俗に言う暴走）が起りにくい、その反面常時トリチウム放出を制限する能動装置の機能が重要な意味を持つ、という点で、安全確保に際しては核分裂原子力における受動的安全性の重視とは異なる性格を持っている[9]。能動的なトリチウム閉じ込めとトリチウム除去に安全性を多く依存するというこ

は、逆に言えばサイト条件への依存性が小さいということである。現在の原子力施設でサイトごとに個別に長期間を費やして実施している安全審査やアセスメントに対し、サイト条件に依存しない許認可で安全が確保できればプロジェクト期間が大幅に短縮できることになる。さらに極端な例として、もしも将来的に核融合プラントがその型式認定で安全が確保できれば、個別製作、建設部分が少なく、どこにも輸出できて市場性が拡大するであろう。立地条件に依存した受動安全でなく、工学的な安全確保、絶対的な低ハザード、低圧熱媒体によるプラントなどが工学的に達成できれば、市場性、増設速度の点で大きな影響がありうる。具体的なイメージをあげれば、メガフロートのような構造物に設置した海上立地が可能なら立地によらず、地震の問題もなく、放出されたトリチウムの環境挙動も周囲の水による同位体希釈でサイト依存性が少ないため、安全性の確保と安全審査プロセスに与えるメリットは大きい。

同様に市場性の向上の観点で重要となるのは増設速度である。いかに市場競争力が高いプラントを実現しても現実に建設できなければシェアは他の発電技術に奪われるのは明らかであり、上記のような安全審査プロセス、建設の工期は市場性には大きな影響を及ぼす。ここで核融合に特徴的な増設速度制約要因は、朝岡ら[10]が指摘した初期装荷トリチウムの確保があげられる。ことに導入後比較的早期では、同時に多数の核融合プラントの建設に対応するだけのトリチウムの確保は不可能であり、他の核融合プラントにおけるトリチウム増殖を待っているのは、市場拡大はおぼつかない。初期装荷トリチウムの確保は先に示したように可能であるが、この核融合の市場性拡大に対する効果は時松ら[11]が報告しているようにきわめて大きい。技術的には、これもトリチウム回収まで含めた総合的なTBRの確保とプラントのトリチウムインベントリーの最小化によって達成されることになる。

さて、最終的に核融合が市場性の確保に成功したと仮定すると、今世紀の末期には、核融合プラントは数100–1,000基オーダーで人類のエネルギー供給の枢要な部分を占めることになる。このそれぞれは、前述のように、需要地の中心である人口密集地帯から大きく隔たっていない地点に設置されることになる。ここで、長期的に問題となるのが核融合廃棄物と環境放出核種である。核融合が仮に導入に成功するとしたときは、原子力で制約条件となる高レベル廃棄物、長寿命廃棄物とその処理処分施設の制約を受けない、という点の一つのポイントとなっているであろう。廃棄物は、主に浅地埋設で生活圏に放出される核種の濃度によってその安全性が評価されることになる。

核融合プラントからの主要な放出核種もまた通常運転時のトリチウム放出である。廃棄物で特に問題となるのもトリチウムと炭素14など、揮発性の物質になりやすいものになると考えられる。核融合プラントはポテンシャルハザードは低いものの、低濃度のこれら核種を常時放出し、しかもそれらは環境中に拡散し、長期的には蓄積して行くことになり、また水や有機物の形で生態系、生体内に入り込みやすい。本格的に核融合がエネルギー供給の重要な役割を

担うためには、核種放出とその環境での長期的濃度の推移が、安全上問題とならないことはもとより、社会的に理解され、受容されなければならない。これは、多数でかつ長期の蓄積を含む影響であるから、核融合プラント1基で達成可能な安全目標よりはるかに厳しくなることは想像に難くない。

5.4.6 市場適合性

核融合エネルギーがその市場を拡大するためには、需要への対応力が必要であり、シェアを増やすにつれ、さまざまな異なった要求に対応しなければならない。5.2.4節で考察したプラント容量の小型化、負荷追従性は、さらに向上すればそれだけ導入できるグリッドが増え、また系統での割合を増加することになる。本稿では詳細に考察していないが、レーザー核融合プラントは、この意味では磁場閉じ込め方式とは大きく異なる特性を持つことが予想される。現時点では最適のプラント規模を判断するだけのデータがそろっていると言いが難いが、技術的には出力にかなり自由度があること、また多数回のパルスを繰り返すことから比較的出力調整が容易であることは想像される。未来のエネルギー市場の要求は予想困難であり、開発目標を狭く限定した場合には技術的に成功しても社会的に選択されない恐れが強くなる。開発目標を社会の要求にしたがって柔軟に変更すること、多数の開発オプションを残して対応可能な幅を広げておくことは市場適合性を確保するために重要である。

起動時間、起動エネルギーも重要である。核融合プラントは起動に要するエネルギーが大きく、場合によってはそ

れが導入できるグリッドを制約する恐れがある。端的に言って、電力が余剰であるときにのみ起動が可能で、需要があるときに備えて常時運転しなければならない、というのは電源としての魅力は小さいといわざるを得ない。

一方では、多数のプラントを市場に導入するためには、構成する装置の標準化が必要である。原子力でも「導入」された炉型は多いが、市場性を獲得したのは軽水炉であり、標準化のために大きな努力が払われている。核融合のような新たな技術では、これと並行して技術基準の整備も必要である。

(小西哲之, 西尾 敏)

参考文献

- [1] 原子力委員会核融合開発戦略検討分科会, 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 (p.43), 平成12年5月
- [2] A.R. Raffray *et al.*, Fusion Eng. Des. **58-59**, 549 (2001).
- [3] P. Norajtra *et al.*, Fusion Eng. Des. **69**, 669 (2003).
- [4] G. Marbach *et al.*, Fusion Eng. Des. **63-63**, 1 (2002).
- [5] S. Nishio *et al.*, IAEA-CN-FT/P7-35, (2004).
- [6] S. Konishi, Fusion Eng. Des. **58-59**, 1103 (2001).
- [7] L.M. Waganer, Fusion Technol. **39**, 458 (2001).
- [8] K. Takahata, J. Plasma Fusion Res. **81**, 273 (2005).
- [9] 小西哲之:「核融合動力プラントの安全性についての考察」J. Plasma Fusion Res. **78**, 33 (2002).
- [10] Y. Asaoka *et al.*, Fusion Technol. **30**, 853 (1996).
- [11] K. Tokimatsu, Y. Asaoka, K. Okano and S. Konishi, Fusion Sci. Technol. **41**, 831 (2002).