資料

核分裂炉開発から見た核融合炉開発

平山省一*, 河辺隆也**

(1993年 11月25日 受理)

*Fusion Power Reactor Development Compared with
Fission Power Reactor Development*

By Shoichi HIRAYAMA and Takaya KAWABE

Both fusion and fission reactors are nuclear plants to maintain the nuclear chain reaction to produce neutrons and energy in industrial scale. History of fission reactor development provides us very helpful wisdom to fusion reactor development.

The authors have studied the construction history of fission reactors and learned that many neutron reactors, having low temperature and small power density, preceded the development of power reactors and those experiences were essential to the smooth development of power reactors. They arrived at the following conclusions:

- (1) More efforts should be made to develop and learn the technology of DT steady state burning by plasma neutron source reactors (PNSR), just playing similar roles of neutron reactors in fission reactor development.
- (2) The objectives of ITER project should be limited to the scientific proof of self ignition of DT fusion to ease its design conditions and get higher confidence of success.
- (3) The PNSR can also contribute to provide another neutron generator, such as VNS and hybrid reactor, to the nuclear industry in which neutrons are playing essential roles.

KEYWORDS : *fission reactors development, fusion reactors development, ITER project, plasma neutron source reactor, hybrid reactors, neutron generators*

I. 緒 言

核融合炉開発は、半世紀近くの核融合研究者の努力が実り、磁気閉じ込め核融合(MCF)も慣性閉じ込め核融合(ICF)も次期もしくは次々期の実験装置で、自己点火条件(核分裂の臨界条件に相当)達成の見通しを得るに至り、世界4極(日・米・EC・ロシア)の国際協力の下に、MCFの自己点火を実証しようという国際熱核融合実験炉(ITER)プロジェクトがスタートした。そして、核分裂動力炉の開発の例にならい、ITERの物理フェーズ、工学フェーズの実験で「実験炉」、「原型炉」の段階を

卒業し、その後、「実証(DEMO)炉」を建設して、2050年ごろまでには核融合動力炉を実用化しようという構想が立てられている。

確かに、核分裂動力炉の技術開発では、実験炉、原型炉、実証炉を経て動力炉を実用化しているが、そのような一本道の動力炉開発を可能にしたのは、動力炉開発に入る前に、核分裂技術開発が中性子(源)炉(工学的に容易な常温炉心の試験研究炉やPu生産炉)の開発と実用化を先行させて、核分

* 神奈川工科大学 (Kanagawa Inst. of Technol.)

** 筑波大学物理学系 (Inst. of Phys., Univ. of Tsukuba)

裂炉の基本的要素技術の習熟や耐放射性材料のデータベースの整備を十分行なっていたからである。核融合技術開発では、まだまだ要素技術や材料の開発が成熟段階に達しておらず、核融合動力炉開発が、自己点火の科学実証後直ちに、このような一本道で実用化が進むとは到底考えられない。

核分裂炉開発の歴史を振り返り、核分裂技術開発と核融合技術開発を対比し、核融合動力炉開発の今後の展開を考えてみたい。

II. 核分裂炉開発の歴史

1939年に核分裂が発見され、1942年には、核分裂の制御された連鎖反応(自己点火条件)を実証する世界最初の原子炉CP-1が建設された。それ以後、1970年までに建設された各種の原子炉を国別、形式別、臨界年次別に集計してみた⁽¹⁾⁽²⁾。

第1図は、核分裂炉開発初期の1955年までに建設された原子炉を臨界年次順に、炉型別(黒鉛型、重水型、軽水型、水均質型、高速炉型)、国別(米国、英国、フランス、旧ソ連、他)に分けてプロットしたもの

第1図 核分裂炉開発初期の原子炉建設 (1940~55年)

である。

第2, 3図は、1950~70年の間に、動力炉開発のために建設された原子力先進国の主要な原子炉を国ごとに年代順に並べたものである。

核分裂炉開発初期段階の最優先課題は原子爆弾用のPu生産炉であった。核分裂炉は燃料、減速材、冷却材の組合せで炉型が決まる。核分裂炉開発の初期には、第1図からわかるように、必要な材料が入手でき次第、それぞれの炉型の核分裂連鎖反応成立を実証する1号炉を建設し、続いて、スケールアップした2号炉、場合によっては3号炉以下を建設して、その炉型の物理特性を確認するとともに、研究炉として活用している。Pu生産炉は、常温、低出力密度で成立するから、材料の耐放射性や工学特性はあまり問題にならず、物理特性の確認だけで、直ちに本格的な生産炉の建設が可能であった。

Pu生産炉実用化に引き続いて、米国は、第2図に示すように、1950年代初めから動力炉開発を始めたが、動力炉では、高温、高出力密度の炉心が要求され、材料の耐放射性、炉の工学特性の確認が問題になり、動力炉の総合システムを実証する実験炉の建設に先立ち、多数の材料照射試験炉や炉の工学特性を試験する試験炉が建設されている。そして、濃縮U軽水型の軍用動力炉を民間発電炉開発に先行して実用化し、その経験を活かして、民間発電炉として、軽水型のPWRとBWRを実用化している。

第2図にはあまり明確に出ていないが、1950年代から1960年代前半にかけて、米国では、国からの補助金で水均質炉、高速増殖炉、高温ガス炉、Na冷却黒鉛炉、有機材冷却炉など広範囲の炉型の開発を展開し、実験炉や原型炉まで建設されたものもある。これらは結局、発電以外にも効用のある高速増殖炉と高温ガス炉を除き、軽水炉に敗北し、実用、定着化に至らなかった。

一方、英・仏・旧ソ連は、第3図に示すように、中性子炉の開発を先行させた後、Pu生産と発電を同時に行なって、経済性を高めた天然U黒鉛ガス冷却型の両用炉を開発し、商業用原子力発電として実用化した。1970年までの世界の原子炉の累積建設基数を臨界年次に対してプロットしたの

第2図 米国, カナダの動力炉開発 (1950~70年)

が第4図であるが、これからわかるように、中性子炉、軍用炉の建設が先行し、発電炉では、現在世界で民間発電炉の主流を占める軽水炉のシェアが、黒鉛ガス冷却両用炉を超えたのは、1970年以降である。

Ⅲ. 核融合炉技術開発と核分裂炉技術開発

核分裂炉の開発は、出力密度がほとんどゼロの非常に単純な常温体系(臨界実験装置)で点火条件の科学実証とその物理特性の確認が可能であった。そして、初めて産業機器で遭遇した放射線雰囲気条件も、極めて低い放射線レベルの臨界実験装置、試験研究炉から始めて、技術的に容易な低

温炉心の材料試験炉、Pu生産炉などの中性子炉で経験を積み、核分裂技術に習熟して動力炉開発に進んだ。動力炉開発に必要な原子炉の発熱、除熱、動力転換などの要素技術も在来の電気ヒータ、電気ボイラと等価で未知要素はほとんどない。それでも、動力炉開発のためには、材料の耐放射線のデータベース構築のための材料試験炉を先行させ、工学特性の確認のための実験炉など多数の試験研究炉と経済性が無視できる軍用動力炉、Pu生産との両用炉に助けられて、今日の実用発電炉が定着している。

核分裂炉開発の流れを整理すると第5図のようになる。第5図左側に示す低温炉心の中性子炉開発が先行し、第5図右側の高温、高出力密度の炉

第3図 英国, フランス, 旧ソ連の動力炉開発 (1950~70年)

第4図 核分裂炉の建設経過

心を必要とするエネルギー源炉がこれを追いか
け, 上段に示すそれぞれの実用炉を完成している。

核融合技術開発におけるITERの第1目標は自
己点火(Q値*が無限大)の科学実証であり, 核分裂
炉開発のCP-1に相当するが, CP-1はゼロ出力の
常温の小規模のもので可能であったのに対し,

ITERでは電気出力100万kWの実用核分裂動力
炉に近い規模と経費を要し, 技術的難易度(リス
ク)も極めて高く, 一国の負担限度を超え, 国際
協力で実行することになった。

核融合炉の自己点火条件を科学的に実証するた
めには, プラズマを高温に加熱し, これを一定時
間閉じ込め, 少なくとも5以上のQ値を得なけれ
ばならない。プラズマ研究者はこのため, 半世紀
に近い悪戦苦闘の末, ようやくトカマク方式で安
定な磁場閉じ込めに成功し, 科学実証達成の見込
みを得たが, これを目指した次期装置ITERは,
大きなエネルギー入力が必要とし, Q値を大きく
するため, 大きな核融合出力を出さなければなら
ず, 装置は巨大化し, 耐放射線, 耐熱設計条件は
核分裂炉より厳しく, 技術的, 予算的に大きな難

* 核融合反応出力と必要なエネルギー入力との比。

題を抱えている。

さらに、核融合動力炉の開発には、自己点火の科学実証(長時間のプラズマ閉じ込め、生成 α 粒子の挙動の確認など)のほかに、DTの定常燃焼技術(連続的な燃料の注入、排ガスの排出など)と、発生エネルギーの有効利用技術(炉心からの取出しと有効動力への転換など)の要素技術の開発習熟と、動力炉としての工学的システム特性の確認、トリチウム取扱技術の開発が不可欠である。これら核融合動力炉の要素技術にはまだまだ未開発で未知の部分が多い。自己点火の科学実証だけでも難題を抱えている複雑巨大なITERに、さらにこれら要素技術と工学システムの工学実証の実施まで目標に入れるのは、なるべく目標を単一化するという技術開発の原則に反する。後者の開発習熟路線を別途に設置することが望ましい。この問題を解決するものとして、DTのDriven Burner*として大きなQ値をねらわず、DT定常燃焼のみを目標としたプラズマ中性子源炉(Plasma Neutron Source Reactor: PNSR)が考えられる。

第6図は、DT定常燃焼をさせるPNSR開発路線を加えた核融合炉開発の流れを示すものである。右側が在来路線であり、左側は追加のPNSR路線である。上段には、それぞれの実用炉を示

す。第5図と対比すると、プラズマ中性子源炉が核分裂動力炉開発の露払いをした試験研究炉やPu生産炉と同じ役割を果たすことがよくわかる。

核融合動力炉はエネルギー生産を目的とするから、Q値が1より大きくなければ技術的に無意味であるが、PNSRのQ値は、中性子の生産コストに関係するだけで、Q値が1より小さい核融合炉でも技術的には有効である。大きなQ値をねらわなければ核融合出力を大きくせず(10 MW以下)、耐放射線、耐熱設計条件の緩和(第1壁の壁負荷1 MW/m²程度)と装置の小型化(直径200 mm、長さ3 m程度のプラズマ)が可能で、既存の技術と市販の材料を用いてトリチウムの消費量の少ない(1 kg/yr以下)小規模、低廉の工学実証炉から出発し、逐次スケールアップして、要素技術やそのシステム特性の実証と習熟を行なっていくことが可能である。そして、実用炉として、核融合動力炉開発のための材料照射試験炉だけでなく、中性子製造装置として、核分裂燃料生産、TRU燃焼、放射性廃棄物消滅など、現代の中性子利用を軸とする核分裂技術への貢献も期待できる。

PNSRは1980年代より、主として「材料照射試

* 濡れた燃え難い木を、石油バーナーで炙って燃やすように、外から燃焼を加勢させるバーナー。

第 6 図 核融合炉開発の流れ

験炉」として多くの概念設計が進められている。

ミラー型の閉じ込め方式を用いた中性子源炉としては FEF⁽³⁾, BPNS⁽⁴⁾, GDTNS⁽⁵⁾ がある。これらはかなり共通した概念であるが、おのおのの特徴は、FEF は加熱に RF を用い、BPNS はプラズマ安定化にインヤンコイルを用い、GDTNS では中性子の発生にスロッシングイオンを用いていることである。10 MW 以下の核融合出力でも材料照射用の照射面積は 1 m² 程度確保できる。また、14 MeV 中性子束は 2 MW/m² 程度である。

近年ではトカマク型⁽⁶⁾⁽⁷⁾や、Z ピンチ型⁽⁸⁾、トロイダルピンチ型⁽⁹⁾、プラズマフォーカス型⁽¹⁰⁾などが提案されるようになった。トカマク型では ULQ 型トカマクプラズマ中に中性子ビームを入射して 2 成分系としたもの⁽⁷⁾が以前より提案されてきたが、最近ではコンパクト・トーラス型の閉じ込め方式でかなりの大きさの中性子源が提案されるようになった。

IV. 核分裂炉開発から見た核融合炉開発への提言

核融合炉開発において、国際協力で進めようと

している ITER の計画目標を見ると、

- (1) D-T のプラズマの制御された自己点火と長時間燃焼(定常燃焼を究極の目標)を実証
- (2) 核融合炉に必要な技術を総合されたシステムにおいて実証
- (3) 核融合炉の実用化に必要な高熱流束機器の総合的な試験を実施

することになっている⁽¹¹⁾。

この目標、特に、(1)の後半と(2),(3)を文字通りに解釈すれば、核融合動力炉としての長時間燃焼の工学試験を、物理と工学の 2 つのフェーズに分けてはいるが、ITER で実施しようとしていることになる。自己点火の科学実証は、半世紀以上のプラズマ物理学者の努力の蓄積で実現可能の見通しが得られているが、その成功にはなお多くの構成機器の性能向上のための開発を要する。これら新規開発の機器の寿命やプラズマ対向材料の耐熱、耐放射線材料の開発を考えると、ITER プロジェクトの想定しているスケジュール内に、この 3 つの計画目標を単一の装置とその僅かな改善で達成することは、工学的にみて不可能といわざるを得ない。

ITERは、「地上にミニ太陽を」という半世紀以上のプラズマ物理学者の悲願を達成する磁気閉じ込めの科学実証段階のゴールとして位置付け、計画目標を(1)の前半の自己点火の科学実証に限定して、現在までの開発の成果を結集して、無理のない実現性の高い設計条件でITER仕様をまとめ、可能な限り早期に目標を達成した方がよいのではなかろうか。ITERプロジェクトは、このように目標を限定しても、冷戦終結後の国際情勢に相応しい国際協力プロジェクトの第1号として、これからの長い人類の発展に対して無尽蔵のエネルギーとなり得る核融合技術の科学的原理の実証を確実に実現することでその意義は十分であろう。

核融合炉開発の戦略としては、第6図に示したように、科学実証をITERで進める一方、工学実証は、DTの定常燃焼技術の開発と習熟を目指したPNSRの開発と実用化の路線を早期にスタートすべきであろう。現在も、核融合動力炉の材料開発の一環として、加速器ベースの小試験片用中性子源と並んで、実条件下の大型試験片照射が可能なPNSRの材料工学試験炉(Volumetric Neutron Source: VNS)の構想も提案されているが⁽⁷⁾、その実現にも、設計条件を緩めた小型のPNSR開発を先行させて、まずDT定常燃焼技術に習熟する必要があるように思われる。

現在は中性子利用の時代であり、核分裂発電はもちろん、核燃料の生産、各種RIの製造、TRU燃焼、放射性廃棄物の消滅など中性子の用途は広い。PNSRは、材料照射試験に限らず、新しい中性子製造装置として核分裂技術をサポートする多くの実用の道がある。核分裂性物質を中性子とエネルギーの増倍材としたハイブリッドはその典型である。核融合技術は、中性子製造装置で現代の中性子利用の社会に貢献しつつ開発と習熟を進め、次世代の原子力としての展開をねらえばよいのでは

ないか。競合する旧技術を持つ新技術は、旧技術をサポートしつつ導入するのが、実用化と定着の早道である⁽¹²⁾。

V. 結 言

筆者らは、核融合炉開発における中性子源炉とハイブリッド炉の重要性について、多くのところで発表してきた^{(12)~(15)}。さらに、核融合技術開発のスムーズな進展に資するため、核分裂炉開発における原子炉建設の歴史を調査し、その結果、核融合炉開発は「地上にミニ太陽を」実現する科学実証と、DTの定常燃焼技術の工学実証とを、並行して開発、習熟することの必要性和重要性を再認識し、本報をまとめた。

— 参 考 文 献 —

- (1) 原子力年鑑(1959, 65年版), 原産.
- (2) "Directory of Nuclear Reactors", Vol. I ~ X, IAEA.
- (3) 平山省一, 他: 核融合中性子炉研究会報告書, (1989), 未来工学研.
- (4) COENCGN, F.H., et al.: UCRL-98132, (1988).
- (5) RYUTOV, D. D.: Proc. Course Workshop on Mirror Based and Field Reversed Configuration, 1987, Varenna, Italy.
- (6) 斎藤正彦, 他: 核融合研究, 57, 241 (1987).
- (7) RENG, M.: IEA Workshop on Neutron Source, Moscow, 1993.
- (8) ROBSON, A. E., et al.: Proc. Japan - U.S. Workshop P-119 on 14 MeV Neutron Source on Plasma Devices, IPPJ-T-37, 197 (1988).
- (9) KRAKOWSKI, R. A., et al.: ibid., 249.
- (10) NARDI, V., et al.: ibid., 213.
- (11) "核融合炉をめざして, 核融合研究開発の現状", (1992), 原研.
- (12) 平山省一: 電学誌, 103, 1132 (1963).
- (13) 同 上: 原子力工業, 38(1), 38 (1991).
- (14) HIRAYAMA, S.: Fusion Eng. Des., 18, 259 (1991).
- (15) 平山省一: 核分裂・核融合ハイブリッド炉研究会報告書, UTNL-R-0176, (1985), 東大原施.