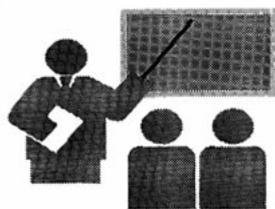


【会議報告】



「魅力あるスマート原子力エンジンの未来」シンポジウム

榊原 安英

敦賀本部 国際技術センター

1. はじめに

新たな原子力産業の誘発と循環型社会、ライフサイクル経済といった社会経済の観点から期待度の高い原子炉システム概念とそれらの運用イメージを調査することを目的に、サイクル機構より、平成12年1月に標記表題の調査を(株)テクノバに委託した。平成12年3月末には調査の結果がまとめられ、情報公開の主旨に沿って社内との関係部署はもとより、大学、研究所、地方自治体及び地元企業等の方にも聴講できるよう案内し、平成12年6月2日、エムシースクエアホールにおいてシンポジウム形式で報告された。

シンポジウムは、サイクル機構・敦賀本部の竹内本部長による「開会挨拶」の後、中村浩美氏(科学ジャーナリスト)を進行役とした「パネル討論」、開発担当者による「調査報告」及び秋山守氏(エネルギー総合工学研究所理事長)による「総括講演」が行われ、最後に、菊池理事による「閉会挨拶」でシンポジウムが閉幕となった。シンポジウムでは、社会経済の観点から期待される原子炉システムの概念の調査結果を踏まえ、核燃料サイクル開発機構において、「もんじゅ」を機軸とする高速炉が、持続性のある信頼性の高いエネルギー供給システムに成熟していくには何が必要か、という活発な議論が行われた。

以下に、本シンポジウムの概要を紹介する。

2. 開会挨拶

竹内本部長より、『本調査結果は、産業ニーズに対応し、かつ、ビジネスソースとして役に立つ原子炉システムとはどんなものであるか、ということ調査したものであり、その結果として、「もんじゅ」技術をどう展開できるか、また、「もんじゅ」設備をどう利用していけば役立つ成果につなげることができるかを検討するためのものであり、言い換えれば、「もんじゅ」再開の意味を

更に幅を広げたり深めたりするものと意味付けている。また、今年「もんじゅ訴訟」では、安全審査の妥当性が認められ、原子力長期利用計画が策定される予定であり、新たな気持ちでFBR開発を進める機運が高まっており、この時期をとらえて、このようなシンポジウムを開催し、また、本日の討論・講演を踏まえ得られた成果を原子力開発、利用方策に反映していくことも重要であると認識している』との挨拶があった。

3. パネルディスカッション

中村浩美氏を全体進行役として、シンポジウムが進められた。パネル討論において、産業牽引力のある原子炉システムが備えるべき要件とはどんなものかを議論の中で明確にし、マーケットプルを目指すための原子炉開発の問題提起を行った。

具体的な発言内容は以下のとおり。

東工大の藤井先生より、「エネルギーの文明論 原子力を見つけた人間の知恵」ということで、人類は、森から草原に生活の場を変え、厳しい環境の中で知恵を使って生き延びてきた。火、風、炭、石炭、石油、さらに蒸気機関の発



シンポジウム風景

プログラム

時間割	講演内容等	パネラー、報告者、講演者
9:50～ 10:00	開会挨拶	竹内本部長
10:00～ 12:00	パネル討論 ・広いユーザーのニーズに答える原子力システムの要件とは？ ・原子力の科学技術発展への貢献 ・リサイクル社会と原子力 ・「もんじゅ」とこれからの高速炉開発	中村 浩美（科学ジャーナリスト） 澤岡 昭（大同工業大学学長） 鳥井 弘之（日本経済新聞社論説委員） 西野 文雄（政策研究大学院大学教授） 新田 義孝（電力中央研究所 研究参事・四日市大学環境情報学部教授） 藤井 靖彦（東京工業大学教授）
13:00～ 16:20	船用炉 可搬型炉 [超小型FBR] 超安全小型炉 [4S : Super Safe Small & Simple] 長寿命安全小型炉 資源拡大型炉 標準型多目的炉	石田 紀久（日本原子力研究所室長） 大坪 章（核燃料サイクル開発機構技術主幹） 飯田 式彦（東芝部長） 関本 博（東京工業大学教授） 三田地紘史（豊橋技術科学大学教授） 吉見 宏孝（富士電機部長）
16:20～ 16:50	総括講演 ・「もんじゅ」開発の意義と原子力システムの将来	秋山 守（エネルギー総合工学研究所理事長）
16:50～ 17:00	閉会挨拶	菊池本部長代理

明による新しいエネルギー源が産業を引き興し、地球環境を変えてきた。これまで、問題が発生するたびに人類は知恵を使って解決してきたが、今、原子力により環境問題解決の可能性が十分にあるはず。原子力の平和利用は、軽水炉の大型化で経済的に成り立つ実用化をなしてきたが、開発途上にある「もんじゅ」を中心とした高速増殖炉は燃料を増殖すること、長期間燃やせることができるので、小型化、分散化のエネルギー利用の可能性が高く、中央集権から地方の時代、ネット社会へと変わっていく中で、社会が必要としている安定エネルギー源としての役割を十分に果たせるものであろう。

政策研究大学院大学の西野先生より、分散化社会とエネルギーについて、発展途上国の援助の一環としてインフラの整備政策をやろうとしているが、原子力の熱源利用等の方策も十分に役立つものとなる。人口爆発、地球環境問題、食糧問題、水不足など、多くの問題を抱えた国々にとって、原子力のエネルギーが供給できれば解決される。必要なところに必要なだけ、使いやすいエネルギーを供給できる原子炉システムが望ましい。しかも、現地での製作の必要のない工場ですべて造って持ち込める原子炉システム、プルトニウムを運んでくる必要のない高速増殖炉には期待できる。発電コストは決して大きな問題ではない。

四日市大学（電中研）の新田先生から、リサ

イクル社会（リサイクル技術システム）と原子力について、地球環境問題は、エネルギー不足問題の裏返しであり、これを機会にプルトニウム利用政策を進めるチャンスとして取り組むべきではないか。エネルギー政策は国が議論して決めた路線を進むのではなく、社会がどう必要としているかという市場メカニズムによって進めるべきである。今後、核燃料サイクル機構は、今後核燃料リサイクル機構に名前を変えるぐらいの意気込みで活動すべきである。

大同工業大学の澤岡先生から、原子力技術の科学技術の発展への貢献について、1960年代のアメリカの宇宙開発は多くの新しく革新的な技術を生み出し、当時の社会に多大の影響を与え役立ってきたが、今ではほとんど役立つものがなくなった。総力をあげてやってきた開発からは、必ず役に立つ技術が生まれてくる。地球の地下深く10kmから100kmに膨大な資源が眠っており、自分が今まで研究してきたセラミックに基づき、ダイヤモンドの焼結材料を使った無人の人工モグラを開発して、地下資源地図を作りたい。そのためには、土を掘削するドリルを動かす小型の動力源や掘り出した土の処理、故障時の対応処置等の技術が必要であり、原子力開発と同様に、集中して開発に取り組むことにより生まれる技術は必ず社会に役立つと期待している。

最後に、日本経済新聞社・論説委員の鳥井先

生より、「安全に対する基本的考え方を議論する場として、今回のようなシンポジウムは画期的であり、原子力の専門家でない方が壇上で、「原子力はいかにあるべきか」という議論を行い、原子力の専門家が聴衆としてその意見を聞くという理想的な形となっている」との発言があった。原子力に期待するものが明確になれば、その目標を技術者がどう達成するかという技術的な問題に取り組むことができるはず。安全についても同様で、ここまで安全に作ったのでこれを受け入れなさいという安全はないはず。安全は技術の問題で、安心は心の問題とは割り切れないはず。原子力が事故を起こして、被害を受けるのは住民である。住民が安心できる安全は、「このレベル」と決めたものに対して、原子力の技術者がそれを技術の問題として達成する努力をするというのがまともであろう。また、人間の直感による安心にも配慮する必要もある。

上記問題提起を踏まえ、核拡散性の問題に対しては、小型炉の概念では燃料交換期間の長い、又は燃料交換の必要のない炉とする考え方が一つの答えであること。経済性の問題に対しては、標準化、大量生産によりコストを下げられる可能性があること、熱利用、海水淡水事業など利用形態に応じて、発電コストという一つの尺度にこだわる必要がなく、エネルギーを徹底的に利用し尽くすことにより経済性が成り立つことなどの議論があった。

4. 調査報告

多様化する電源、熱源等のエネルギー源として運用展開が可能な原子炉システム概念の調査に基づき、提示されたシステム概念では目標がどこまで達成できるかという講演があった。発表概要は以下のとおり。

(1) 船用炉（石田 紀久：日本原子力研究所）

原子力船の実用化には、経済性及び信頼性の向上が在来船以上に強く要求される。そのため、船用炉は、軽量・小型化、系統の簡素化、高安全性、運転・保守が容易でなければならない。

原研では、我が国初の原子力船「むつ」の開発成果を基に、改良船用炉の設計研究を進めている（大型商船用原子炉「MRX」、海中調査船用原子炉「SCR」等）。

MRXは熱出力100MWの一体型炉であり、水張り式格納容器方式の採用、原子炉容器内装型制御棒駆動装置、受動的崩壊熱除去システム等を採用

することにより、「むつ」と比較して原子炉出力が3倍であるにもかかわらず原子炉の重さ及び容積を約1/2に軽量・小型化し、作動機器の大幅削減による安全系を大幅簡素化し、大破断LOCA、制御棒飛出事故等の過酷事故想定を排除、さらに事故発生時でも常に炉心冠水維持可能にして安全性を高め、高度自動化システムを採用して運転性向上を図ったものである。

MRXを搭載した原子力コンテナ船とディーゼル機関の在来コンテナ船で、アジア-北米航路のコンテナ輸送について、経済性比較を行った結果、高速（30ノット以上）かつ大容量6,000TEU（TEU：Twenty Feet Equivalent Unit）で原子力船の方が有利になる。今後、在来機関の排出ガス（NO_x、SO_x、CO₂）規制が厳しくなることが予想されるので、経済的にもまた環境負荷の面でも原子力船は更に有利になる。

MRXはその特長を活かすことにより高安全性、高経済性が期待されるので、船舶用としてのみならず、パージ船に搭載し発電、海水脱塩、熱供給の多目的利用が可能である。また、陸上に設置することにより、小規模発電、熱供給などの分散型エネルギー源として、利用可能である。

「SCR」は更に小型化を追求した熱出力約1MWの一体型炉であり、地球環境変化の予測研究のために、これまで調査の緊急性にもかかわらず氷海のため調査できなかった北極海の海中を調査するための原子炉である。

(2) 可搬型炉 [超小型FBR] (大坪 章：核燃料サイクル開発機構)

平成元年度からフロンティア研究活動の一環として、「もんじゅ」の技術をどう生かすかという観点から検討を行ってきた。検討結果、実用化の見込みのあるのは、超小型FBRを深海で用いる高速深海炉のみであろうということになった。より一般的にいえば、「FBR技術を使用すれば具体的に、どのような性能を持った海底で使用可能な電源が可能かという問いに対する、明確な答えを出すこと」である。

海洋研究者は、十～数百kWeの海底で使用できる電源を欲している。これは、環境問題や長期気候予報用の無人海底基地、更には有人海底基地用の電源として利用される。無人基地は、海洋における観測データ、すなわち海底から海表面までの海水温度、速度、塩分を即時に測定することを目的とした音響検出器を、多数配置した基地である。観測データは人工衛星を通じて直ちに陸上の観測基地に伝達される。

超小型FBR開発が望ましいと考える理由は次のとおり存在する。

海すなわち太平洋は永久に日本の横に存在する。

このような電源は、長期間遠隔運転の可能なFBR技術が最適の分野である。

超小型FBRには旧ソ連でのコスモス宇宙船電源という実用化例がある。

これが現在までの大型FBRを含むすべてのFBR技術にとって、唯一の実用化例である。

高速深海炉の一次系は液体金属冷却高速炉(LMFR)であり、二次系はガスタービン発電システムすなわち、密閉ブレイトンサイクル(CBC)である。CBCは宇宙開発用に米国NASAで開発済の技術で、現在10kWeのCBCコンポーネントは民間会社から市販されている。すべての機器が深海の高圧に耐えるため、耐圧殻中に設置されている。

(3) 超安全小型炉 [4S: Super Safe Small & Simple] (飯田 式彦: 東芝)

アジア、アフリカという開発途上国で人口増加、食糧危機を招くおそれがある状況をかんがみ、超安全で小型/簡素なシステムを考案した。使用される地域の特徴を考慮に入れて、

燃料交換に代表されるようなメンテナンスはほとんどないこと

できれば運転員なしで安全な運転が可能なこと

不測の事故がおきても放射性物質が外に漏れないこと

原子炉の出力は必要とされる水量に応じた程度であること(結果として50MWeとなります)

国際原子力機関による核物質管理が容易であるよう、原子炉は封印し、何かあれば衛星にて国際機関に通報できること

以上を原子炉の設計目標とした。まず、長期間燃料交換なしで運転すべし、という要求から炉心の内部で燃料を持続して作り出せる高速中性子の利用が合理的であるという結論。次に、複雑な動的機器を減らすべし、という目標から動的機器の代表格である制御棒をなくして、炉心から外に飛んできた高速中性子をもう一度炉心に反射させることで炉心の燃焼を制御するという反射体制御炉心の利用を考えた。この設計は、同時に安全性を向上させることができるものである。冷却材にはNaを選定した。動的機器がないほうがよいので、電磁ポンプを使う。メンテナンス軽減のための長期燃料交換なし原子炉という概念について、

DOEからは、核拡散抵抗性の最も重要な要件だという指摘を受けた。原子燃料は原子炉容器の中で利用している状態が最も核不拡散に寄与するという考え方である。後に米国が原子力政策として始めた「革新的原子力技術の公募」においても、全面的にこの考え方が採用された。

(4) 長寿命安全小型炉 [鉛ビスマスを用いた小型高速炉] (関本 博: 東京工業大学)

次世代の原子炉である高速炉も実用化のためには軽水炉と太刀打ちできる経済性を示さなければならぬ。この観点から、原子炉は大型化すれば製品である電気を安くできると考えられており、軽水炉は時代とともに大型化し発電コストが低く押さえられてきた。この考えは高速炉についても当てはまると考えられ、大型高速炉の研究開発が行われてきた。一方では、小型炉でないためという原子炉としては、まず開発途上国、僻地、離島といったところで利用するものが考えられる。「日本で作って、インドネシアの島で使う原子炉」を設計した。設計の必要な条件としては小型以外にメンテナンス・フリーということ、このためには長寿命炉であることが望ましいこと、日本で作り、インドネシアに運び、そこで運転し、終わったら日本に持って帰るということを考えて。この間、燃料交換等で炉容器を開けることはしないで、新しい原子炉と交換することを考えると、核拡散抵抗性はすこぶる高くなる。一般に小型は中性子の漏れが大きく、臨界にすることが難しい。鉛ビスマスは、中性子を閉じ込めるのにナトリウムよりかなり優れており、小型炉の冷却材として使用するに適している。鉛ビスマスは、水や空気とあまり反応しないので、蒸気発生器を原子炉容器の中に入れてしまい、現地にある発電部分とは水系で接続することが可能である。今回設計した長寿命小型安全炉は、鉛ビスマスを用いたものとしては世界最初のものとなった。出力150MWt、炉容器の外側直径は5 m、高さは9 mと極めて小さく、12年間燃料交換なしで運転できる。この炉の特長は極めて安全なことで、ポンプが止まることと、すべての制御棒が抜けてしまうという厳しい事故が同時に起こったとしても燃料等の健全性は保たれ、事故原因が取り除かれれば、また原子炉を再開できる。また、この設計作業の中で鉛ビスマスの性能が明らかになり、世界の各地でこれを使った小型炉の設計が提案されている。

(5) 資源拡大型炉 (三田地 紘史: 豊橋技術科学大学)

トリウムは中性子を1個吸収すると核分裂性の

ウラン (^{233}U) に変わる。トリウムは資源として、天然ウランの 3 ~ 4 倍の埋蔵量があるので、仮に現在の全世界の原油消費量をトリウムに置き換えるとすると、今後 1,800 ~ 2,400 年にわたり使用できる事になる。近い将来、トリウムは人類にとって重要なエネルギー資源になると考えられる。

トリウムを効率よく使用できる原子炉の一つとして溶融塩炉がある。この溶融塩炉には現在の原子力が抱える社会的、経済的な問題を解決し得る技術的ブレイクスルーがあると考えられる。

講演者らの研究グループが概念設計した溶融塩炉 (U 炉) は、電気出力が 15 万 kW の小型炉である。オークリッジ研究所の場合には、増殖炉を目指していたため複雑であったが、炉の製作、運転、保守を含めた経済性を考慮して、簡単な構造とした。炉容器内に六角柱状の黒鉛減速材を多数詰め、その隙間に設けた流路に常圧の溶融塩を流す。減速材の集合体の外側は、中性子の漏洩防止のため、黒鉛反射体で囲む。

溶融塩はリチウム、ベリリウム、トリウム、 ^{233}U の各フッ化物の混合液であり、これを黒鉛減速材の集合体中に入れると、 ^{233}U は核分裂反応を引き起こす。発生中性子の一部がトリウムに吸収されて ^{233}U となる。 ^{233}U は減少した分だけ補給すればよい。発電した電気量当たりで比較すれば、溶融塩炉の核分裂性ウランの補給量は軽水炉の 8 % 程度にすぎない。溶融塩は化学的に安定な物質であり、水や空気と触れても爆発しない。また、例えば炉容器が壊れたとしても、溶融塩は黒鉛減速材の集合体から離れると核分裂連鎖反応が停止するため安全である。

現在、原子力を利用する上で、核拡散、核テロリズムの観点より、多量のプルトニウム (Pu) の蓄積が社会問題となっており、また、後世代への負の遺産として多量の長寿命核廃棄物の発生が深刻な問題となっている。発電した電気量当たりで比較すると、溶融塩炉における Pu の発生量は軽水炉の約 0.3% と少なく、長寿命核廃棄物の発生量は軽水炉の約 10% と少ない。溶融塩炉はプルトニウム及び核廃棄物に関連する深刻な社会問題を大幅に軽減する能力を持っている。

溶融塩炉に補給する核燃料としては、 ^{233}U の代わりに、軽水炉使用済み燃料からの Pu や、解体核兵器から得られる Pu を使用することもできるので、余剰プルトニウムを消費しつつトリウム資源を利用する魅力的なエネルギーシステムを構築できる。

(6) 標準型多目的炉 [高温ガス炉の特徴と開発状況] (吉見 宏孝: 富士電機)

モジュール型高温ガス炉の基本構成を以下に示す。

燃料

高温ガス炉ではセラミックスで被覆した被覆燃料粒子を用いる。被覆燃料粒子は耐熱性に優れ、1,600 程度の高温になっても、被覆の健全性は損なわれない。

冷却材

冷却材として、4 ~ 7 MPa に加圧したヘリウムを用いる。ヘリウムは相変化がなく、また、核的な効果をほとんど持たないため、1 次冷却材バウンダリ破損などにより減圧しても極端な除熱性能の変化がなく、炉心の反応度にも影響を与えない。また、化学的に不活性であるため、構造物の腐食の問題もない。

減速材

減速材に用いる黒鉛は、減速能が水と比べて低いため相対的に大きな体積を必要とする。このため、炉心は大きな熱容量を持つ。黒鉛は耐熱性に優れる (昇華温度約 3,000) とともに軽水と比べ中性子の寄生吸収が小さいという特長を持つ。

モジュール型高温ガス炉の特徴として、優れた固有の安全性を有している。モジュール型高温ガス炉では、原子炉の安全確保のため必要とされる事故時の機能は、次のように、特別な設備を必要とせず自然に達成される。

原子炉停止 (止まる)

冷却系機能喪失時には、負の反応度温度フィードバックにより自然に核反応停止

崩壊熱除去 (冷える)

全冷却系機能喪失時には、コンクリート、土壌等への自然放熱で炉心 (燃料温度) は制限温度 (1,600) 以下に維持

放射性物質の閉込め (出ない)

、 の固有の安全性により、FP は被覆燃料粒子内に閉じ込められる。

モジュール型高温ガス炉の優れた経済性は、次の要因により、化石燃料プラント、大型軽水炉に競合できる経済性を実現できるポテンシャルが高い。

高い固有の安全性 安全系統の簡素化

直接サイクル G/T 発電 高い発電効率 (45 ~ 50%)、単純なプラント構成

小型モジュール標準設計 連続生産効果、許認可標準化、現地工事低減

需要地近接立地 送電コスト低減

運転・保守の容易性

モジュール型高温ガス炉の運転・保守の容易性については以下に示すとおりである。

安全システム・安全上重要な機器が少ない
自己制御性に優れ、運転容易
事故時の対応単純、高度な判断不要

4. 総括講演（秋山 守 エネルギー総合工学研究所 理事長）

21世紀のエネルギー問題の解決への糸口は、省エネルギーと再生可能なエネルギーであり、豊かな資源を背景にしたエネルギー供給安定性に優れ、また、環境適合性に優れたという特性から、原子力エネルギーがその解決の鍵を握っている。また先端科学技術としての原子力は、「未踏領域への挑戦」と「持続可能な発展」へ寄与しうる資質を十分に備えている。この原子力が、次世代システムとなりうるための要件は、経済性、核拡散抵抗性、より高度な安全性、最少の廃棄物排出量であり、新規市場の開拓、分散型への挑戦などの展開が期待される。

また、高速増殖炉は、我が国におけるエネルギー選択肢の一つであり、その中での「もんじゅ」の役割は、発電プラントとしての信頼性実証であり、ナトリウム技術の確立である。効率のかつスリムな開発体制を達成しつつ、その目的を達成するために早期に再開すべきであろう。魅力ある発電プラントとしての「もんじゅ」における研究開発は、

燃料・炉心特性の確認

蒸気発生器等の大型機器の性能・信頼性の実証

ナトリウム取扱技術の確立

高燃焼度燃料開発と実証

設計、安全評価技術の検証

が挙げられ、更にそれに追加するとすると

FBR条件下における中性子照射場の提供

「もんじゅ」データの活用、運転経験に基づく国際協力

FBRサイクル技術開発の中核的役割

などが挙げられる。

最後に、(why) 原子力は、エネルギーセキュリティはもちろんのこと、先導的カルチャー形成として必要であり、(what) 科学技術の体系に位置付けられた原子力エンジンを開発の目標として、(who) ユーザー主導の市場動向・指向を見

ながらプラント概念を設定して立地していく、(when) この時期では時を急ぐ必要があり、米国の戦略に対しても先手を取り、若い人が夢を持って大学の活力を利用しながら先手を打っていく必要があり、(how、where) 今回のシンポジウム開催を機にこの活力を維持し、複眼的（俯瞰的）に知的フロンティア、知的満足を得ながら実益も得られ、国際貢献しながら協力も、近い未来を見極めつつ遠い未来に夢を掲げ、大型原子炉も小型原子炉へも自由な展開を想定しながら進めることが重要である。仏教で言う「智慧」の慧というのは究極の高いレベルの悟りを意味しており、これを目指して頑張りましょう、という激励の講演があった。

5. 閉会挨拶

菊池理事より、シンポジウム開催に至った経緯の説明、パネラー、報告者、講演者の方々及び参加者へのお礼、感謝の意が述べられた。また、「もんじゅ」開発によって蓄積された原子力技術が元となって、魅力あるスマート原子力エンジンにつながっていくことを改めて認識したとの挨拶があった。

6. おわりに

本シンポジウムでは、一般参加を含め、地方自治体、地元企業、大学、研究所、マスコミ関係者及びサイクル機構職員等の約120名のご参加を得て、主催者側のサイクル機構にとっても大変有意義な時間を参加者と共に共有することができた。会場であるエムシースクエアのホール入れなかった参加者には、別途、中継方式で別会場に設定したテレビ画面より、臨場感のある会場の活発な討論、調査報告及び総括講演を視聴していただいた。また、シンポジウム開催に当たり、企画、進行、運営等に調査委員会の先生方から有意義な意見・協力をいただいたことに感謝申し上げます。また、シンポジウムに参加いただいた原子力分野の有識者からも多くのご意見を頂くとともに、「もんじゅ」再開にかかわる励ましの声も掛けていただいた。最後に、「もんじゅ」を中心とした開発の意義、原子力システムの将来について、夢のある幅広い将来を見せていただいたこと感謝するとともに、ご意見を反映し、更なる意気込みをもってFBR開発に努力していきたいと考えている。