

シンポジウム開催報告

地球温暖化問題における原子力エネルギーの役割

- 高温ガス炉による熱供給と高速炉による高レベル放射性廃棄物処理について -

2014年4月に策定された新しいエネルギー基本計画には、原子力が重要なベースロード電源と位置づけられ、高レベル放射性廃棄物の減容・消滅処理を進めるための開発を行うことや高温ガス炉の研究開発を進めること等が盛り込まれた。また、IPCC第5次評価報告書においても、原子力エネルギーは成熟した低排出ベースロード電源であるが、安全性確保や廃棄物処理などの課題が、低炭素エネルギー供給に対してのますます大きなバリアになっていると指摘された。

このような背景を踏まえて、キャノングローバル戦略研究所は、国内外の専門家を招聘し、地球温暖化抑制における原子力エネルギーの長期的役割について議論し、今回は特に産業への高熱供給が可能な高温ガス炉と、高レベル放射性廃棄物を消滅し、且つ、安価で安定した電力を長期に供給できる高速増殖炉に絞って、議論を行った。

1. 開会挨拶

福井俊彦 キャノングローバル戦略研究所理事長

最近、オイル価格の急激な下落が世界的な話題となっている。果して、今回のオイル価格の下落は世界全体のエネルギー供給構造の変化を背景とするものであろうか。いずれにせよ、世界全体として、持続可能なエネルギー源の開発、そのために必要な技術の開発は、今後も欠かせない重要な課題であり続けている。今日のシンポジウムのテーマはそれに直接繋がるものである。

福島原子力発電所の大事故以後、日本においては、それまでのエネルギー基本計画並びに温室効果ガス排出抑制のプログラムの両方が宙に浮いた状況になっている。昨年春、安倍内閣は新しいエネルギー基本計画を策定した。同計画中には、原子力規制委員会が世界で最も厳しい基準を適用して、合格と認める原子炉を順次再稼働することや、原子力を改めてベースロード電源として位置づけることなどの内容が盛り込まれている。それらの点では前進が見られるが、全体として新しいエネルギーミックスをどうするのかというような重要なポイントは、まだ今後の課題として残されている。昨年暮れにリマで開催されたCOP20では、この春3月末までに各国の新しい温室効果ガス削減の自主目標を持ち寄りとなっているが、日本がそれに間に合うかどうか、非常に懸念されている状況にある。

キャノングローバル戦略研究所では、湯原研究主幹を中心に、エネルギーや地球環境問題について幅広い角度から研究を進めてきている。すでにオーバーシュートシナリオを軸とする温室効果ガス排出カーブの提案や、世界全体の最適化の中にきちんと位置づけられる

日本の長期エネルギー構成についての提案を行ってきた。また同時に、様々な新しいエネルギー源に関する技術開発を促進するための提言もいろいろと行ってきた。今日のテーマにある高温ガス炉に関しても、以前に一度シンポジウムを開催した。今日は、特に原子力エネルギー等について、専門家中の専門家による、的を絞った議論の展開を期待している。特に高温ガス炉についての議論、さらに燃料サイクルと高速増殖炉、高レベル廃棄物の最終処理といったような議論、場合によってはそれらの議論の中でトリウムを燃料とする原子炉まで議論が及ぶかもしれない。率直な議論が行われ、結果として高い成果が上がることを期待している。

2. 基調講演 - 地球温暖化抑制と原子力の役割

湯原哲夫 キヤノングローバル戦略研究所理事・研究主幹

新たに公表された IPCC 第5次評価報告書では、世界で共有する温室効果ガス（GHG）の排出シナリオの検討において、従来の濃度安定化シナリオに対してオーバーシュートシナリオが検討されるようになってきている。そこでは、今世紀末までの総排出量が温暖化の決め手となる重要な指標であると指摘されている。また、千年程度かけて収束する温度上昇と今世紀末までの温度上昇を区別し、従来の平衡温度上昇 2°Cは、2100年には 1.6°Cの過渡的溫度上昇に対応していると記述されている。さらに、今世紀の温度上昇を 2°C以下（50%の確率）にするためには、5つのカテゴリーのパスウェーが提示されている。

キヤノングローバル戦略研究所が 2009 年から提唱してきた Z650 シナリオは、その 5つのカテゴリー内に入っている。今世紀中の総排出量を 650GtC に制限し、22 世紀半ばにゼロエミッションの実現を仮定して、さらにオーバーシュートを取り入れたこのシナリオは、最新の知見を踏まえた気象科学の検証により、今世紀中の温度上昇を 2°C以内に抑える確率が 50%前後になるものである。Z650 は、そのシナリオの制約のもとに、世界全体のエネルギーシステムのコストミニマム最適化を図り、長期エネルギー構成とそれによる二酸化炭素の排出を算出し、共有すべき目標を提案している。GHG の大半を占めるエネルギー起源 CO₂ の排出量は、世界全体で 2005 年に対して、2030 年に 20%増、2050 年に 25%減になる。そのために、先進国と途上国は 2050 年に 2005 年比で、それぞれ 50%減と 10%増になる。この世界全体コストミニマムとする長期エネルギー構成において、化石燃料、原子力並びに再生可能エネルギーの割合は、それぞれの経済性によって定められ、世界全体で見ると、2030 年実績の 7 : 1 : 2 から、2050 年の 5 : 2 : 3 を経て、2100 年の 3 : 2 : 5 へと変化していく。世界の電源構成には、今世紀の半ばから原子力が常に 30%程度の割合を占めており、大きな役割を果たすことになる。この重要なエネルギー源が欠如した場合のシナリオ解析では、地球温暖化抑制コストが大幅に増加する結果になっている。

最適なエネルギー構成の実現には、低炭素技術の開発と普及が不可欠である。特に、高効率でクリーンな火力発電技術と CCS、再生可能エネルギーの大規模な導入を可能にするシ

システム、原子力エネルギー利用技術、および産業用プロセスヒートの低炭素化が欠かせない。これらの分野には、継続的なイノベーションを推進する取り組みと普及の仕組みが必要である。

世界解析で得られた日本のエネルギー起源 CO2 の排出パスウェーでは、2030 年と 2050 年の排出量がそれぞれ 2005 年比で、20%と 50%の削減となっている。それを実現するための日本のエネルギー構成では、高効率な火力発電の推進、原子力発電の維持、再生可能エネルギーの大規模な導入をバランスよく行うことにより、地球環境・経済性・安定性が確保できる。原子力エネルギー利用の維持には、①ウラン資源の有限性を克服するために、軽水炉から高速増殖炉への移行によって持続可能な燃料資源を得ること、②原子炉の安全性を確保するために、福島事故を踏まえて、全電源喪失事故を回避するとともに、全電源喪失しても炉心熔融事故を回避すること、並びに固有な安全性を有する高温ガス炉を開発すること、③高レベル廃棄物の最終処分のために、使用済み燃料を再処理し、燃料を作り、高レベル廃棄物はガラス固化し、地層処分すること、並びに高レベル廃棄物を減容化し、低レベル化する技術開発を進めること、④産業競争力を維持するために、原子力技術を自主開発すること、などの課題を解決する必要がある。

当研究所は、昨年に第一回目の「高温ガス炉と高レベル核廃棄物の消滅処理について」のシンポジウムを開催した。同シンポジウムでは、高温ガス炉が、自然に停止し、冷却し、高い放射性物質を閉じ込める能力を有する高度な安全性を持つことを確認した。また、燃料の高効率利用による資源問題への貢献、熱利用による温室効果ガス排出削減への貢献、水素社会への貢献などを議論し、原子力機構における HTTR を用いた研究開発、水素製造技術の研究開発、また海外の高温ガス炉の開発を取り巻く現状と動向が紹介された。その結果、その後に閣議決定された新しいエネルギー基本計画に、高温ガス炉の継続開発が取り入れられた。

本日のシンポジウムは、講演とラウンドテーブルディスカッションにより構成される。講演においては、①気候変動問題への対応において原子力エネルギーに期待される役割、②高温ガス炉の役割と研究開発現状・動向、③燃料サイクルと高速炉の役割及びその実現の具体的なシナリオ、等について国内外の専門家が紹介・解説する。ラウンドテーブルディスカッションにおいては、①高温ガス炉開発における国際協力のあり方、②燃料サイクルの維持と高速増殖炉導入計画の長期スケジュールと具体的規模、等について議論する。

3. 講演 - NGNP in the U.S.

Matt Richards 米国 Ultra Safe Nuclear Corporation Director

化石燃料の利用拡大は地球の炭素循環に悪影響を与えてきて、CO2 排出量の削減は将来のエネルギー政策の最優先課題の一つである。化石燃料由来が 91%の米国の 2012 年のエネルギー消費の半分は産業と運輸による熱需要であるため、低炭素の熱供給が化石燃料消費の

削減に貢献できる。そこで、原子力エネルギー利用拡大の一つとして、高温性能を高めた次世代原子炉が必要である。

そのために、米国において、「2005年エネルギー政策法（EPACT）」の制定により、次世代原子力プラント（NGNP）計画が法制化され、その新型炉の一つとして、モジュラー型高温ガス炉システム構想が確立され、エネルギー省（DOE）の資金提供で、研究開発が進められてきた。2007年の予備的概念設計、2008-2009年の概念設計の検討を経て、2010-2011年に概念設計が行われ、米国原子力諮問委員会（NEAC）に提出した。その後、NEACが官民連携の推進、規制枠組みの商用化適応、設計検討の継続、NGNP建設への取組みの促進などの勧告を出した。しかし、DOEの燃料を含む技術開発が成功し、産業アライアンスが策定中であるが、官民連携はいまだに確立されておらず、更なる設計作業も保留中になっている。

NGNP産業アライアンスは、高温ガス炉技術の商用による原子力の産業用拡大で化石燃料の依存度を縮小する目的を持って、原子力メーカー、材料メーカー、エネルギー産業、石炭産業などにより構成され、さらに韓国原子力水素アライアンスや欧州原子力熱電併給産業イニシアティブ（NC21）と協力協定を締結した。これまで、原子力発電所敷地調査、オイルサンド開発や石炭液化への応用、製造プラントへの熱供給などを行ってきた。

モジュール型高温ガス炉は、多用途に適合して設計し、受動的固有安全性、競争力のある経済性、高い熱効率、多様なエネルギー出力、柔軟な核燃料サイクル等の利点を有する。また、高温熱を供給できることで、石油精製、オイル採取、石炭・ガス化学、水素製造、製鉄などの産業に活用できる。北米だけで大きい利用ポテンシャルを持っているが、シェール革命による天然ガスの低価格により現段階の展開は難しいため、ガス価格の高い日本と韓国には将来性が大きい。

NGNP産業アライアンスは、現在欧州NC21との共同事業構想（GEMINIイニシアティブ）を検討している。企業の連携協定のもと各国政府の協力を得て実証プラントの建設を計画し、資金は3分の1が米国政府、3分の1がEU政府、3分の1が米・欧の参加企業が負担する構想で、グローバル市場を狙いつつ、双方のエネルギーセキュリティへの貢献を期待する。このような国際協カスキームで日米協力も可能ではないだろうか。

NGNP計画の現段階最大のハードルは、実証プラントの高額な建設資金の調達である。高いレベルの政府援助が必要だが、DOEのマッチングファンド政策をクリアするため（官民各50%の負担）、国際連携によって官民の資源を出し合うことに期待する。

4. 講演 - Japanese Development Plan for HTGR

岡本孝司 東京大学大学院工学系研究科教授

福島事故の反省から、外部事象の考慮、アクシデント管理、避難などのポイントが挙げられる。それを踏まえて、新しい原子力の安全は、ヒトと環境を守るために、深層防護、Graded Approach、継続的改善などが重要になっている。そのため、固有の安全性を持つ高温ガス炉は、大きなポテンシャルを持っている。また、高レベル廃棄物処理及び燃料サイクルの面から見ても、高温ガス炉が一つの解になり得る。日本の大洗には、10年以上前から、JAEA

が HTTR を建設・運転・実験をしているが、震災後停止しており、現在運転再開の審査を行っている。

高温ガス炉 (HTGR) の利点は、厳しい条件においても安全であること、高温熱を提供できること、放射性廃棄物がとじ込められており、直接地層処分できること等が挙げられる。一方、HTGR の考えられる欠点は、SMR であるが故に、大型化できないこと、大きな建設地が必要になること、複数プラント問題、高い建設コストなどがある。但し、HTGR に関してはいくつかの誤解もある。たとえば、いまだ開発中であるという誤解や、グラファイトが燃える、地震に弱い、コストが高い、核不拡散問題などという誤解である。

以上をまとめると、高温ガス炉は、①非常に完全な原子力技術である、②コストも競争力を持っている、③高レベル廃棄物が直接処分できる。

2014 年 4 月に決定された新しいエネルギー基本計画に、高温ガス炉の研究開発を国際協力の元に確実に進めるべきと記述された。それを受けて、6 月に文部科学省の科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会の下に、原子力科学技術委員会の高温ガス炉技術研究開発作業部会が発足し、9 月までに今後の研究開発について議論を重ねた。異なる温度 (750°C、850°C、950°C) のガス炉とその研究開発状況をレビューし、現状認識を確認した上で、開発項目、国際協力、今後の予定などに関する報告書をまとめた。産業界、政府と学术界によるアライアンスを年度内に構築し、研究開発計画や人材育成をしっかりと検討していくことになっている。

これらの議論をベースに、日本の HTGR 戦略は、個人的に下記のようになると考えている。

- ① 輸出インフラ (850°C ガスタービン HTGR)
- ② プルトニウム燃焼炉
- ③ 使用済み燃料の直接処分
- ④ 水素製造

5. 講演 - EM²: A Compact Gas-Cooled Fast Reactor for the 21st Century

Robert Schleicher 米国 General Atomics

世界のエネルギー消費は、今後 30 年間に 50% 増加すると予測されている中で、地球温暖化抑制のために、僅か 7.3% の割合を占めるカーボンフリーエネルギーの利用を拡大しなければならない。太陽と風力エネルギーのポテンシャルは大きいですが、大きい敷地面積と高いエネルギー貯蔵コストが必要になるため、大規模利用は難しい。原子力はベースロードになり得るが、安全かつ経済性のあるプラント及び多目的利用の研究開発が遅れば、化石燃料の利用削減は達成できない。21 世紀の原子力プラントに必要な特徴として、高い安全性、経済競争力、少ない廃棄物、燃料の柔軟性、立地の柔軟性、核不拡散の適合性、出力負荷調整可能性などが挙げられる。

そこで GA 社は、廃棄物を転換して長期にわたり燃やす炉心、先端燃料、高温システム、高速 Generator、使用済み燃料サイクルなどの研究開発のベースに、次世代原子炉 EM2 を研究開発している。その特徴は、軽水炉の 5 倍になる燃料利用率、軽水炉の 5 分の 1 になる少ない高レベル廃棄物、48~53%の高い熱効率、完全受動型安全性、42 カ月の短い建設時間などが挙げられる。モジュール型ガス冷却高速炉である EM2 は、1 基 500MWt で、設計寿命 60 年（炉心寿命 30 年）、多様な燃料を利用可能である。短い建設期間で設備投資が削減でき、長期燃焼炉心設計と燃料設計で高い燃料利用率が実現できる。ドライクーリング特性は、設置可能面積を大きくし、軽水炉の米国土面積の 13%に対して同 60%に拡大できる。

6. 講演 - 高速炉の役割：日本の課題と世界の課題

飯田式彦 株式会社イーツーエム

高レベル放射性廃棄物の最終処理には、安全性向上のための処分施設の縮小と処分期間の短縮を図るのに、毒性の高いマイナアクチド（MA）を除去する必要がある。海外では、核廃棄物から MA を 99.9%分離できる技術は確立されている。また、分離された MA を消滅するには、高速炉の利用は中心技術として検討されている。簡単な試算によると、高速炉による MA 消滅を行う場合、発電コストの増加は現状の発電コストと比較して 5-10%以内である。また、世界の高速炉開発と実用化には、ロシア、中国、インドのようなエネルギーセキュリティの観点から増殖志向があれば、フランスやアメリカのような増殖技術を習得した上で廃棄物対策を優先させる国もある。

そこで、世界中で唯一、消滅の実績のある「もんじゅ」を持つ日本にとって、原子力エネルギー利用の課題、即ち廃棄物消滅処理と原子力発電量確保、の解決に、高速炉の大きな役割が期待されている。2014 年現在蓄積している軽水炉の使用済み燃料は、17,000 トンでありお、その中に 170 トンのプルトニウム（Pu）と MA がある。今後の原子力発電の利用状況によるが、仮に運転再開して 60 年で終了する場合、2069 年までに、Pu と MA の合計量は約 500 トンになる。また、軽水炉の設備容量は、2030 年までに 46.3GW が維持され、その後減少し、2069 年になくなる。

これらの廃棄物消滅処理と原子力発電量を確保するために、2030 年から高速炉を導入するシナリオを検討した。2069 年までに、MA 消滅に利用し、その設備容量は 25GW に達する。その後、増殖技術を利用して、設備容量を維持する。このシナリオを実現するために、2054 年まで六ヶ所再処理工場をフル稼働させ、Pu と MA を分離して混合燃料を製造し、MA 消滅高速炉に提供する。2054 年六ヶ所再処理工場閉鎖後、新しい再処理工場が導入され、同じ役割を果たす。それにより、2070 年に長半減期高レベル放射性廃棄物を全部処理する。それ以後、高速炉リサイクルの完成により、25GW の原子力発電容量を維持する。

一方、キャノングローバル戦略研究所は、地球温暖化抑制の世界エネルギービジョンを検討している。その中で、高速増殖炉には大きな役割が期待されている。この高速増殖炉は2050年に導入開始され、2100年には世界の電源の4分の1強を占める。ここで、燃料需給の分析からその実現に向けての課題と解決策を検討していく。

世界の軽水炉使用済み燃料は、2010年に334,500トンが蓄積されており、シナリオ分析によると、2050年に752,900トン、そして2100年に1,468,900トンに達する。高速炉の燃料であるTRUは、軽水炉の使用済み燃料から分離する必要があり、そのために再処理施設が六ヶ所相当の容量で46基必要になる。核不拡散の観点から、世界を適切なグループに分けて、燃料サイクルを行っていくことになる。施設容量、地政学などの条件を加味して、世界が6つの大きなグループに分かれる可能性がある。中国、インド、ロシアの3カ国は、独立グループになり、フランスを中心とした欧州とアフリカが一緒になり、米国が南北アメリカをカバーし、日本と東南アジアが連携グループになろう。これらのグループ内で、国境を越えて燃料サイクルを行い、燃料を輸送する。

また、既存の高速炉燃料増殖技術の中には、高い安全性を持つものがあるが、それらは低増殖比しか実現できない。そういった低増殖比に基づく2100年に導入可能な高速増殖炉の容量と、ビジョンに期待される容量との間に大きなギャップが存在する。そのため、金属燃料を用いる安全な高増殖炉心の研究開発と利用が必要である。

7. ランドテーブルディスカッション

モデレーター 段峰軍 キャノングローバル戦略研究所主任研究員

湯原哲夫 キャノングローバル戦略研究所理事・研究主幹

岡本孝司 東京大学大学院工学系研究科教授

飯田式彦 株式会社イーツーエム

木下幹康 東京大学客員研究員

松井一秋 エネルギー総合工学研究所研究顧問

小川益郎 日本原子力研究開発機構 原子力水素・熱利用研究センター

氏田博士 キャノングローバル戦略研究所上席研究員

地球温暖化抑制に貢献するために、原子力を多目的に利用することと長期的に利用することが必要である。そのため、本日のシンポジウムで、発電だけではなく産業用プロセスヒートも提供できる高温ガス炉技術、また放射性廃棄物処分に活躍でき且つ原子力エネルギーと超長期利用できる高速炉技術が紹介された。ここで、この2つの技術及び地球温暖化抑制のための原子力シナリオの3つの議題をディスカッションする。

高温ガス炉技術は、すでに実用できる段階にきているが、商業用普及には実証のためのリードプラント建設が必要である。日本の技術を輸出するという意味で、リードプラントを

海外で建設するのもいいが、人材育成の意味からも、日本の産業用プロセスヒートは高温ガス炉を必要とする意味からも、地球温暖化抑制のための高度発達産業社会のモデルを示す面からも、やはり国際協力を踏まえながら国内で建設するメリットが多い。しかし、国内での建設が難しい現状を考えると、遅滞なく進めることも大事である。このような状況で、やはり政府が、温室効果ガス削減策として、公的資金投入で進めるのが望ましい。国際協力に関しては、先進国間に限られている資源を集結して研究開発を進めるアプローチが GIF で展開されており、実際に必要とする途上国に実証を含める適用アプローチもあり得る。後者の場合、最先端の技術の応用より、現地の需要を満たしながら、低コストのリバースイノベーションが重要になる。

高速炉は、高レベル廃棄物の処理に貢献できるだけでなく、長期的な視点で見れば、人間社会の長期エネルギー供給を支える技術である。化石燃料資源が 100 年間で枯渇していく中で、他に利用できるエネルギーは原子力と再生可能エネルギーである。その再生可能エネルギーは永久に続くが、密度が低い。原子力の燃料となるウラン資源も制約があるので、軽水炉のワンススロー利用だと、100 年間程度しか利用できないが、増殖技術により利用期間を 100 倍伸ばせる。つまり、高速増殖炉の本質的な利点は、人間社会に 1 万年のエネルギー源を確保できることである。そのために、燃料サイクルと増殖に関して、異なるアプローチの技術開発が進められている。複数のオプションを並行して、早期実現に向けて進むことが望ましい。

モデル解析結果が示したように、地球温暖化抑制のため、原子力が軽水炉 - 燃料サイクル - 高速炉という技術路線で大きく貢献するシナリオは、燃料需給の解析により実現が難しいと指摘された。そこで、本シンポジウムで議論した高温ガス炉の活用の検討により、同じ役割を果たせる代替的な原子力シナリオは可能である。エネルギー起源 CO₂ の総排出量が変わらない前提で、高温ガス炉を導入してカーボンフリー熱源を産業プロセスに提供して天然ガスを代替する。導入規模は、2030 年に 400GWt で、2050 年から 1200GWt である。節約できる天然ガスを電力部門に回して、コンバインドサイクル技術の利用により発電し、原子力発電を代替する（軽水炉中心に代替し、2050 年以後一部高速炉代替）。新しい原子力シナリオには、従来のシナリオと比べて、今世紀内のウラン資源消費量はほぼ同じで、2050 年の軽水炉導入量は約半減、2100 年の高速炉導入量は約 2 割減となっている。発電技術と熱供給技術の効率的なコンビネーションにより、従来シナリオによる大量な使用済み燃料の発生と高い増殖比の必要性という課題は改善できる。

(了)

文責 キヤノングローバル戦略研究所 段