

CIGS エネルギー2050 研究会 シンポジウム
地球温暖化問題に対する原子力開発の役割～高温ガス炉と廃棄物消滅処理について～
総括報告

1. 開催日時：2014年2月24日（月） 13：00-17：30
2. 会場：新丸ビルコンファレンススクエア（新丸ビル9F）

目的

温室効果ガス排出量の低減を確実に実施するための方策の一つとして、次世代原子炉の一つである「高温ガス炉」からの高温の熱を産業・運輸部門の熱利用分野へ供給することが挙げられる。高温ガス炉は、ロバストかつ固有の安全性で定評がある原子炉で、電気エネルギーに加え、熱エネルギーの利用、さらには水素製造など他産業にも役立つことが期待される。

今後の我が国の原子力利用の継続における重要課題の一つに、高レベル放射性廃棄物の処理問題が挙げられるが、現在、高レベル放射性廃棄物の発生量を大幅に削減できる技術オプションが開発されている。

我が国が温室効果ガス排出量低減方策のモデルを世界に示すため、新たな原子力開発のトピックスとして、高温ガス炉と廃棄物消滅処理について議論を行う。

今回の国内シンポジウムの内容

【開会挨拶】

キヤノングローバル戦略研究所（CIGS） 理事長 福井 俊彦

日本は今、将来に向けて非常に多くの課題を抱えているが、その中で最も重要な課題の1つが福島第一原子力発電所の事故以降、以前のエネルギー基本計画が宙に舞っている状況にあることである。アベノミクスをバックグラウンドとして、これから日本はさらに前進していこうとする重要な時期にあり、アベノミクスの第1の矢、第2の矢に次いで第3の矢では、民間部門が前に向かって動いていく、政府は後押しする形にならなければならないと思っている。その場合に、エネルギー基本計画をいつまでも放置したままでは明らかによくないことだと思う。従って、エネルギー基本計画を日本が自信を持ったものにしていき、民間部門の方々が自信を持って自ら先頭を切って動くことができるためには、原子力エネルギーについてきちんと科学的な再検証が進むこと、そして人々に分かりやすい言葉で語り理解してもらおうことが、非常に大事だと思っている。

福島第一原子力発電所の事故の後、それ以前にあった安全神話が崩壊したことに伴う人々の心理的なフラストレーションは非常に深く、そしてそれが長く続いている状況だと思う。この状況に対して、心理的な問題を心理的な対応で解決するのではなく、これからの時代の原子力エネルギーとはどんなものなのか、そして最終的な高レベル放射性廃棄物処理についてこういうふうを考えていくのだということ、1人でも多くの方が理解することが、出発点になるのではないかと考えている。これからの原子力エネルギーについては、専門家の間だけで納得し合うだけでは極めて不十分であって、今後はできるだけ多くの方々にその考え方を共有してもらおう努力が非常に大きな領域として加わってきていると考え

ている。

福島第一原子力発電所の事故を振り返ってみると、原子炉周辺あるいは廃棄物の最終処理を巡る非常に高度な専門知識を要する部分以外に、もっと現場的な、どこの会社でも普通にやっているはずのリスク管理について深く反省する事柄が多いと私は思っている。現場におけるリスクマネジメントが甘いと、結局は脆弱な部分が露見して、それが大きなアクシデントにつながるということになるのではないかと心配する。

私の切なる願いは、このシンポジウムで専門家の方々が新しい考え方を共有された後は、できる限り多くの方にやさしい言葉で、こういう進歩があった、しかしなおかつこういう点に大きなリスクが潜んでいる、でもこれは現場の管理でここまでカバーできます、という話を分かりやすく話していただきたいということである。

【基調講演】地球温暖化に対する世界のエネルギービジョンと原子力開発の役割

キヤノングローバル戦略研究所 理事・研究主幹 湯原 哲夫

最近では我が国の貿易赤字の11兆円のうち3兆円が、原子力が稼働していないことによる燃料調達に伴う国富流出と言われているが、むしろ価格交渉力を失ったことが大きいと考える。

地球温暖化の問題は年々悪化し、すでに非常に厳しい状況であるが、地球温暖化抑制に対する取り組みは逆に、非常に緩んだものになっているよう見える。共通目標に対して、長期的なエネルギーの在り方を議論してきたが、京都議定書が非常に危なくなってきたおり、新しい枠組み作りが必要な段階に来ている。国際的な枠組みとしては、各国が各自の努力目標を立てていくことになるわけだが、それで地球全体として温暖化を抑制することができるのかが、非常に大きな問題だと思う。

世界で共有できる削減曲線をどう設定するかが重要課題である。IPCC第5次レポートのワーキンググループ1が発表され、全体の排出総量が非常に重要だということが初めて言われたが、これは従来から我々が提言してきた内容にかなり近づいてきている。我々は、2050年に世界で50%を先進国で80%を削減するのはなかなか難しいと考え、多少のオーバーシュートを有しながらも今世紀中に2度Cに収めていく削減カーブであるオーバーシュート・シナリオを作成し、それを元に世界全体で削減費用を均等化しながらエネルギー構成を求めていく方法を採用している。それによれば、2050年に世界で25%削減し先進国で50%削減すれば良いという結果となっているが、実現可能な課題として、2050年前後からほとんどの火力発電にはCCSを整備し、CO₂を隔離して貯蔵せざるを得ない。また産業や民生における熱利用も大規模な省エネルギーなしには達成できない。さらには再生可能エネルギーを大量に導入する必要があるが、非常にコストが増える。また感度解析によると、「CCS無し」あるいは「原子力フェーズアウト」を考えた場合、途上国の成長にとって非常に大きな影響をもたらすことになる。最大の問題は、産業用の熱利用をなかなか削減できないことである。削減目標は与えられるが、鉄鋼やセメントや化学産業が使っている熱利用の分野で、なかなか思い切った削減が進みにくく、進んでいる日本においても非常に厳しい状況になっている。

中長期の2100年頃までのシミュレーションにより、原子力発電の維持と産業用熱量の低炭素化は不可欠だということが分ってきた。原子力について安全性を高めた第三世代、さらには第四世代の安全な原子炉開発が、福島第一原子力発電所事故を踏まえて進められてきている。

このシンポジウムでは、次世代の軽水炉や高速増殖炉に加えて、まず高温ガス炉を紹介する。高温ガス炉が産業用のプロセスヒートを供給することにより、CO₂を削減していくための非常に良いオプションだということを説明する。また、原子力発電にとって高レベル放射性廃棄物を減容化し低レベル化することは、長い間の問題だったが、今回のエネルギー基本計画案にそれが明確に書かれている。地層処分を進めながら、高レベル放射性廃棄物の減容化あるいは消滅化を計る具体的な施策が出てきていることにも注目すべきである。

日本は米国から軽水炉を技術導入したが、同時に原子力委員会の意志によって、日本の自主開発を1960年代からずっと進めてきた。「むつ」から始まり、重水炉で天然ウランだけで発電できる新型転換炉である「ふげん」、それから「常陽」、ウランからプルトニウムという資源を安定して生み出していく高速増殖炉である「もんじゅ」、など1960年代、70年代の研究者・技術者たちは技術導入するだけでなく、国家百年の計に近い原子力開発を進めてきた。現状でも少なくとも原型炉のレベルぐらいまでには達している。自主開発技術を大事にすることが、原子力の今後にとって極めて重要なキーワードだと思う。高レベル放射性廃棄物の処理・処分においても、自主開発技術が要である。

【第1部 地球温暖化問題と高温ガス炉】

高温ガス炉の現状と展望

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 センター長 小川 益郎

①高温ガス炉の内容、②国内外の状況、③社会からの要請に対して高温ガス炉がどのように応えることができるのか、④将来展望の4点について紹介する。

高温ガス炉はおよそ950℃の温度を出すことが可能で、軽水炉では300℃程度、高速増殖炉が500℃程度である。これだけの高温度を出すことにより、産業界の様々な工業用途に熱を供給できる。また、温度が高ければ高いほど理論効率が良くなり、多くの電気ができる。今の軽水炉の熱電効率は33%程度であるが、高温ガス炉で950℃にすると50%となり、すなわち半分くらい電気にできる。これは電気だけではなく水素についても同じような特性があると言える。

高温ガス炉と呼ばれるものの発展は、「ガス冷却炉→改良型ガス冷却炉→高温ガス炉→超高温ガス炉」と時系列的に進んでいる。つまり、第1段階、第2段階、第3段階であり、高温ガス炉は世代でいえば第3世代にあたる。高温ガス炉は、軽水炉と同様に、原子力黎明期から開発が進められ、ガス冷却炉から始まり、現在37基ほど商用化されている。改良型ガス冷却炉については、14基ほど商用化されている。ここまでは冷却材として炭酸ガスを使用している。高温ガス炉の歴史は、高温化の歴史そのものであり、まず400℃、600℃、700℃、そして現在950℃まで達している。より高温にするために黒鉛を使用するが、炭酸ガスと黒鉛は600度を超えると反応するため、ヘリウムガスを冷却材として使うようになった。高温ガス炉は、過去に実験炉や原型炉がアメリカやドイツ等で開発され、最近には中国で実証炉が建設されている。そしてさらに950℃まで達する、いわゆる、4世代になるHTTRを大洗に試験研究炉として進めている。日本のHTTR、これまでの高温ガス炉の技術、それから知見等を全て集約し、さらに日本の最新の技術を加え、実験炉→原型炉→実証炉→商用炉といった段階を踏み、開発を進めている。

高温ガス炉の安全性、放射性物質、経済性、その他の特性、について説明があった（省略）。

今後必要なのは、リードプラントを建設し、商用の高温ガス炉を建設することである。仮に 750°C の熱供給炉であれば、技術的には今すぐにも日本で建設可能である。既に中国ではそれが実現しつつある。高温ガス炉は、将来の水素利用など様々な可能性を秘めている。

高温ガス炉が拓く革新的低炭素エネルギーシステム

東京工業大学 原子炉工学研究所 エネルギー工学部門 准教授 加藤 之貴

本日の話では、今日に高温ガス炉が導入された場合に、①エネルギーの活用ができるか、②日本がどのように変わっていくか、の2点について述べる。高温ガス炉を使うと、3つの利点がある。1つ目は水素製造が可能になること、2つめは燃料をより効率的に利用（燃料改質）ができること、3つめはCO2排出無く炭素を再循環利用しながらエネルギー供給が実現できる可能性があることである。

供給熱の温度が950°Cに達すると、従来では不可能な、水素製造、燃料改質、CO2を循環・統合等が可能になる。高温ということは質が高いという意味で、効率の良い発電、物質製造ができる。HTGRは高効率で水素製造が可能で、燃料電池の燃料に利用可能できる。トヨタ、ホンダが2015年にも市販すると表明した燃料電池車の例に見られるように、水素利用という分野が今できつつある。また産業用にはアンモニア、身近なところではマーガリンや化粧品等、これら全に水素が必要になってくる。

日本が製造技術と1次エネルギーである高温ガス炉のセット輸出することが大事な戦略だと考えている。高温ガス炉が高温源として利用できると、資源が節約でき、CO2の排出削減ができる。これには、水素改質、炭素循環がポイントになる。将来展望を考えると、アジアでの熱需要は必至で、そこに高温ガス炉をどう役に立てるかが日本のポイントだと思う。日本は産業プロセスに世界一の技術を持っており、材料も世界一の技術を持っている。この2次産業の技術力と1次エネルギーの高温ガス炉も世界一の技術である。1次エネルギー付きで産業プロセスを海外で役立てることが、世界に対して日本が大いに貢献できる分野だと思っている。

ラウンドテーブルディスカッション

キャノングローバル戦略研究所 主任研究員 段 烽軍

(エネルギーシステム構成)

我々が提案している「Z650」という世界CO2排出シナリオは、世界が2050年にCO2を50%削減でなく、25%削減すれば、人類の経済活動から排出される温室効果ガスによって引き起こされる地球全体の平均気温上昇を、産業革命前と比べて2°C未満に抑えるという目標は守れるというコンセプトである。ただし、2050年に25%減であれば簡単というようなイメージがあるかも知れないが、実際は非常に厳しい。成り行きシナリオ(BAU)の世界のCO2排出の全体の量に比べると、Z650の低炭素シナリオでは大幅削減となる。工学エネルギーモデルを用い、将来のエネルギーシステムの社会像と、それに合わせるCO2排出をシミュレーションモデルにより予測している。このシミュレーションでの結果は、次の2点にまとめられる。1つは発電部門のCCSがCO2削減に相当な貢献をしており、CCSのCO2削減分に占める割合では、2030年で約14%だが、2050年には20%という結果になる。2つ目は産業民生部門のCO2排出は長期的に継続し、なかなか減らない結果となっている。産業部門でのCO2削減が進まない理由と

しては、エネルギー消費量データを見ると、化石燃料（石炭、石油、天然ガス）の削減量が少ないことが挙げられる。要するに、熱が必要な時に、何らかの形の燃料を燃やす必要があるため、なかなか化石燃料利用削減に繋がらないのである。「では水素にすれば良い」という話もあるが、実際に水素製造のコストは極めて高い。水素を産業部門に回し、電力部門で CCS を行い、そして産業部門に CO2 排出枠を与えたほうが全体として削減費用は安いという結果になっている。このため高温ガス炉を導入することで、電力供給やプロセスヒートの直接供給を可能にし、水素を製造し、さらに他の部門にマルチに供給を行うというシステムというオプションが存在する。

（中国の高温ガス炉）

福島第一原子力発電所事故以降も中国は積極的に原子力発電所を建設している。現在、商用運転しているものは 17 基、試運転中は 3 基であり、それぞれ 2013 年末の 11 月、12 月、2014 年 1 月に臨界を達成し、今夏前には商用運転に入る見込みである。それと同時に、現在建設中のものが 28 基あるが、そのうち 16 基は、福島第一原子力発電所事故の影響により、今は建設を中断している。現在、建設中の原子炉には多くのタイプがあるが、承認済と計画中の原子炉に多いのは AP1000 型炉、あるいはそのファミリーである CAP1400 型炉であるが、この CAP1400 型炉は AP1000 型炉をベースに中国で 2 次開発したものである。この中に 1 つだけ高温ガス炉の商業実証プラン（HTR）がある。電力産業の意見には、沿海地域は AP1000 系列が中心で、内陸部はガス炉中心が適切ではないかという意見もみられ、高温ガス炉は軽水炉の補完的な位置付けであると認識されている。

【第 2 部 高レベル放射性廃棄物の処分】

高レベル放射性廃棄物の消滅処理について

株式会社イーツーエム 飯田 式彦

原子力の利用に際しての懸念事項一つに、高レベル放射性廃棄物の問題がある。原子力発電所から出る使用済燃料に含まれる毒性の高いマイナアクチニドは、①発熱量が大きく、処分施設のコスト影響をもたらし、②自然崩壊に時間を要し「何万年も何千年も」の放射能毒性を支配する。世界各国はその処理のための研究開発に資源を集めておりその実態を客観的、横断的に調査した。

核分裂反応による高レベル放射性廃棄物のソースになるものはマイナアクチニドと呼ばれ、2 つに大類される。1 つ目は中性子を吸収して 1 つ高い次元の核物質に変わるもの（プルトニウム、アメリシウム、ネプツニウム、キュリウム）、2 つ目は、核分裂生成物である。このマイナアクチニドを「処理する」ことは、高レベル放射性廃棄物を「管理する」ことを意味する。

軽水炉の燃料はウラン 235 という核分裂性物質と、中性子を受けると次の核分裂に変わる可能性のあるウラン 238 という 2 つの核物質からできている。原子炉を止めると、燃料は壊変して、ウラン 235 からネプツニウム、ウラン 238 ではプルトニウム、ネプツニウム、アメリシウム、キュリウムなどの核種に変換していき、最後は鉛になる。しかし、鉛に変わる間に燃料が途中形態を通るわけだが、それに何万年、ものによっては何百万年という時間がかかるため、研究開発に対して非常に大きなチャレンジとなっている。

使用済燃料からマイナアクチニドを分離する方法には、大きく 2 つあり、一つめはフランスが採用し

ている化学法による分離の仕方（湿式法）、2つめはアメリカで行われている電気分解の逆反応によりそれぞれの持っている核種の自由エネルギーに似合うエネルギーを掛けると欲しいものが集まる方法（乾式法）がある。その効果は、マイナアクチニドの3つのうちの一番崩壊熱の高いアメリカシウムを除去すると高レベルの放射性廃棄物処理施設の専有面積が、除去しない場合に比べて1/7になる。さらに、ネプツニウム、キュリウムも全部除去できると、同専有面積は1/10と縮小できる。各国では処理施設の専有面積を1/10にすることが可能であれば、技術的に進める意味があると理解して進めている。

さらに、技術的・工学的なことは重要であるが、それ以外の社会的なリスクコミュニケーションの一部として重要なことがある。それは、高レベル放射性廃棄物の低減期間の問題である。原子力発電に伴い発生する高レベル放射性廃棄物は、長期にわたって高い放射能レベルが続き、人間の生活環境から安全に隔離し後世代に管理の負担を残さないようにする必要がある。技術的には、マイナアクチニドを99.9%除去できると、処分施設の放射能が天然ウラン放射能による人体への影響レベルにまで低減する期間が、数十万年から数百年オーダにまで短縮される。数十万年というと気が遠くなる話だが、数百年、例えば300年程度というタイムレンジであれば、我々の想像力の働く世界で、原子力発電の反対派や慎重派とも話を始められるのではないかと考える。我々ができる最善の努力により99.9%のマイナアクチニドを除去でき300年までに毒性を減らすことができることが、我々の今の到達点であると思う。

マイナアクチニドを分離した後、放っておけばまた数万年貯まっているだけで、これを変換させることもまた重要である。マイナアクチニドを変換（すなわち分裂）させたいが、ネプツニウム、アメリカシウム、キュリウムは非常に速い中性子を当てると実は燃料になる。軽水炉の熱中性子では燃料ではなく毒物だが、高速中性子を当てると核分裂性物質に変換しエネルギーを出すため、燃料として使うことができる。ネプツニウムを、例えばセシウムとストロンチウムに変えてしまう。核分裂する確率というものを注目すると、ネプツニウム237という同位体は、熱中性子においては3%の確率で核分裂するが、高速中性子を当てると27%、約10倍の核分裂確率となる。これにより、高速中性子を使ってマイナアクチニドを分裂させる方法が、非常に合理的だという考えに行き着く。

ラウンドテーブルディスカッション

キヤノングローバル戦略研究所 上席研究員 氏田 博士

（原子力の安全と研究開発）

原子力の安全に関し言いたいことは2つある。1つは、安全性とはハードウェアをガチガチに固めれば良いというものではなく、もっと運用と実際に働いている人たちの緊急時における対応力等も含めた、総合的なものとして安全を見ていかなければいけない、それをリスクアナリシスでバランスを持って見ないといけないものであると思う。安全問題では、軽水炉に対しては今度の事故で様々な対策を検討しているが、それをもっと合理的にやっついていかないといけない。2つ目は、リスクをどうやって下げていくかという話と、もう一つの軸としての将来的のベネフィットがどのようなものがあるのかということも見ておかなければいけない。

今後の技術研究開発は、2100年までに地球温暖化に対して何をやっていくべきかを決めた上でフィードバックをかけていく、すなわちバックキャストして2050年には何を技術開発を、2030年はどういう技術開発をしなければならないというようなことを見ていかない限り、本当に進まないのではないかと

と感じる。要するに地球温暖化に対してどうするかをロングレンジで思い、そのために自主技術開発をどうするかを考えていかなければならない。

CO₂ の制約として Z650 削減シナリオを用いて、技術によりどのくらい減るかを見た場合、一番大きいのは省エネ、また実は CCS もかなり大きく、それから再生可能エネルギー、その次に原子力となっている。その原子力に対しては、安全対策や消滅処理等により安全と信頼性を高めていくことが、原子力がさらに CO₂ 削減のための技術として入っていくために必要なことだと考える。21 世紀の将来性を考えると、省エネも再生可能エネルギーも原子力も CCS も全て必要である。その原子力が入っていくためには高温ガス炉や消滅処理は 1 つの可能性を示すことになる。高温ガス炉は、運輸や定置への熱供給にどのくらい使えるかという可能性を示したものと言え、消滅処理は原子力の社会必要性を高めるために必要なものであると思う。安心のためにはシステムの安全性と当事者への信頼が必要で、そのシステムが利用されるためにはリスクが低く、かつベネフィットがあるということが理解される必要がある。今回のその 2 つのトピックスは合理的な議論を積み重ねていく上で必要なこと、それを積み重ねて原子力がどうあるべきかについて議論していくことが必要である。

総括

キヤノングローバル戦略研究所 理事・研究主幹 湯原 哲夫

本日は、高温ガス炉と高レベル放射性廃棄物の処理について議論し、出したメッセージは理解されたと思うが、その実現可能性については色々議論があったということだと思う。

高温ガス炉については、炉心溶融が起りにくい原子炉であるということ、産業用の高い温度の熱を供給できるということ、さらに再生可能エネルギーとのマッチングも良い原子炉であると紹介された。特に中国がこの実現、商業炉に向けて非常に大きな努力、政策を決定し、着実に進んでいるという報告を受けた。しかし日本の原子力発電技術、あるいは利用技術を実用化していくときに非常に大きな壁があるということも指摘された。

3 月 11 日の福島第一原子力発電所事故以降、様々なことが大きく変わったと思う。その中で、温暖化の問題が非常に厳しい状況となってくると、原子力エネルギーの利用では単に発電だけではなく、熱も利用していく、ということも 1 つのメッセージとして出せたと思う。

再処理、特に放射性廃棄物の消滅処理については、今の時点における最新の情報、技術レベルがどこまで来ているかが紹介された。分離技術が進んできており、世界の状況は分離効率が 99.9%まで来て、高レベル廃棄物を無毒化する期間を大幅に短縮できるというのは、1 つの大きなメッセージとして受け取るべきだと思う。しかし、現実はどういう主体がどういう事業としてやっていくのかについて、やはり慎重な設計、実用化のためのデザインが必要だと思う。いずれにしても、原子力分野だけではないことであるが、日本は基礎研究はトップレベルにあっても実用化や商用化のところで周回遅れになるということをずっと繰り返してきているような気がする。3.11 事故は、そういうことを変えていく良い機会であるとの思いを強くした。

原子力技術にとっての 2 つの大きな問題、炉心溶融を起こさない原子炉の開発と、高レベル廃棄物の消滅、無毒化、短縮化、について技術的なメッセージだけでなく、それを実現する道筋を社会的にあるいは政策的に、さらには商業化のために、プログラムとして今後考えていくべきだと思う。