

尾本原子力委員会委員の海外出張報告

平成 22 年 6 月 22 日

1. 出張先

米国（サンディエゴ）

2. 出張期間

平成 22 年 6 月 13 日（日）～ 19 日（土）

3. 渡航目的

6 月 13 日～17 日で、米国サンディエゴで開催される icapp2010(新設計原子力発電プラントに関する国際会議)に出席し、我が国の原子力政策等に関する意見交換を行う。

4. 日程

6 月 13 日（日） 成田空港発→サンディエゴ空港

6 月 14 日（月）-6 月 17 日（木）

icapp2010(新設計原子力発電プラントに関する国際会議)に出席

6 月 18 日（金） サンディエゴ空港発→

6 月 19 日（土） 成田空港着

5. 報告

第 10 回 icapp はサンディエゴで米国原子力学会の年会に併設される三つの会議の一つ（他は、水素生産と燃料材料）として開催された。全体で約 1400 人の参加を得て開催された。ANS 本体の会議でも、米国と世界での原子力の復活と将来についてのセッションが幾つかもたれて、icapp と重複の嫌いがあった。

ANS 会議では科学的技術的知見の活用が icapp では新規建設がそれぞれ開会プレナリーセッションのテーマとして取り上げられた。出張者は、icapp 初日のプレナリーセッションで原子力発電の新設を中心にした国内動向と世界レベルでの課題についてスピーチを行い、効率的効果的な規制についてのセッションで議長も務めた。

印象に残ったのは、原子力発電利用拡大の成功条件の議論、米国での小型モジュール炉への期待の高まり、米国でのウランの利用率向上を目指した新たな概念の追求（使用済燃料に含まれるウランや劣化ウランの有効利用、軽水炉燃料の再処理を経ないで高速炉時代への移行シナリオ、TWR などウラン利用効率向上炉など）、ベンチャービジネスの小型原子炉開発への投資、水素セッションへの参加者の少ない事、食品照射の拡大方策に関する論議であった。

以下に、テーマ毎に ANS および併設の 3 つの会議での発表と出席者との意見交換に

より得た知見を記す。

新規建設

- 中国の SNERDI によれば、1) 今後 20 年間の新規建設はこのところ常に上方修正され、最も積極的な案では 2020 年 90GWe(発電量の 6%) 2030 年 200-250GWe(発電量の 10%)であるが実際は 2030 年 150GWe であろうこと、2) AP1000 の国産化で CAP1400 を 2017 年には運転開始の意向。
- ナイジェリアは、アフリカで原子力発電を実現させるには、1) 政治的な安定、2) 国境を越えた共同プロジェクト、3) 核兵器禁止ゾーン設定による相互信頼の 3つの条件が必要と述べた
- WH 社は、米国が今日原子力発電所の新規建設に向かう背景（漸次低減にあるが 1.5-2%/年の電力需要成長、低炭素社会化、エネルギーセキュリティ、南部等で最も安い電源であること）と新規建設成功の条件（設計を建設以前に固めること、債務保証、単純な設計、モジュール工法による短期建設、サプライチェーンの確立、公衆の支持）を挙げた。サプライチェーンの確立に向けて、ショーグループによるモジュール工場、PWR 一次系ポンプ生産工場、Alstom のタービン工場などの例を紹介。公衆の原子力発電新規建設への支持は、2001 年に賛成が反対を逆転し今では 62%-33%と差を広げている (Gallop 調査) と報告。
- 2 基の AP1000 (V.C. Summer 2&3) を計画している SCANA 社は、建設コストは電力コストを含め約 4450\$/KWe (10.68B\$/ 2AP1000) であること、中国での三門建設におけるあらゆる経験と教訓が得られるよう中国の SNTPC との間のパートナーシップ契約を締結している事を明らかにした。

小型モジュール炉 (SMR: Small Modular Reactor)

- a) IAEA は中小型炉の市場参入可能性は、1) グリッドの小さい開発途上国、2) 離島やコンビナートなど特殊な環境条件、3) 需要増に見合う形で設備を追加して投資リスク回避の 3つの主要分野でありうるとみて来た。米国では上記 3) の投資リスク回避を主な動機としつつ、更に米国の今日の状況を考慮し、設置する炉を大型だけでなく米国の置かれた状況にマッチできる小型炉も交え多様化する (one size does not fit all) 考えが出て来ている。具体的には、送電線新規建設の困難から従来の送電線の範囲で中小型炉を分散電源として設置、大型鍛造機器の製造能力が失われた米国製造業の実情に会うべく小型機器だけで発電所構成、加州のように海水冷却が禁止される州の増加を想定し空冷小型発電所設置。
- b) SMR 設計では受動安全、モジュールが共通点で、その多くが工場生産のモジュール原子炉を鉄道輸送で現地に運び現地での工事は最小限にすることが想定されている。また、併せて核燃料物質の利用効率を上げることも目標にした新しい小型炉設計も出て来ている。
- c) しかし、ペーパー原子炉にしないために、設計者が大型発電所と比較した保守す

べき機器と運転員の増加からくる経済性インパクトや燃料サイクルや必要になる材料開発について今後真剣に取り組む必要のあることが感じられた。

d) 以下に発表や言及のあった SMR 設計を示す。

- EM2 (GA 社)：使用済燃料の被覆管を除去した粉末か劣化ウランを用いたブランケット燃料を MOX 炉心周辺にて配置したヘリウム冷却高速炉 (250MWe) で、30 年燃料交換不要を謳っている。米国は Kr 放出規制が厳しいことによる被覆管除去時の処置および材料開発が課題になる可能性。
- mPower (B&W 社)：B&W 社固有のワンスルー蒸気発生器利用と Savannah River, Deutsche B&W による Otto-Han を前駆とする圧力容器と蒸気発生器の一体化技術を使った PWR (125MWe) で空冷復水器、4 年の運転サイクル。TVA, FirstEnergy, Oglethorpe Power と電力 3 社から支持を得ているので、NRC の審査のプライオリティが高いと言われている。
- NuScale (NuScale 社)：原子炉建屋と格納容器の間を最終ヒートシンクの水で満たした自然循環 PWR (45MWe) で 4000\$/KWe の建設費を謳っている。
- SMART (KAERI/KEPCO)：淡水化プラントとセットにして開発途上国市場を考えた一体型 PWR (90MWe) で、開発試験をほぼ終えて今年中に政府から FOAK プラントの建設の承認を得る予定である。KAERI (韓国原研) が 1997 年以来開発してきたもので、最近 KEPCO コンソーシアムがプロジェクトに加わった。
- その他、UH 燃料を用いる Hyperion (27MWe), TWR, 4S など

ファイナンス

- 新規建設への連邦政府の債務保証を得る事がプロジェクト推進の上で必須条件であることは不変だが、次年度分の債務保証の前倒し適用がまだされていない。
- 米国 Ex-Im 銀行は、債務保証、融資保険、直接融資のいずれのパターンも米国からの原子力プラントに適用可能であることを説明。ただし、相手国の CSC 条約への加盟、設計の IAEA 安全基準への合致、世銀の環境ガイド遵守を条件。
- 米国ベンチャービジネスは年間 4-6B\$ (GDP の 0.2%) 規模で、クリーンエネルギー分野にその 1/5 程度を投資。投資分野を決める際、今後の成長の可能性と市場規模の 2 点が重要で、インドや中国では個人あたりの電力消費がまだ米国のそれぞれ 1/10, 1/30 のレベルで今後脱炭素化が必須と考えられるところから原子力発電は膨大かつ大きな成長の期待される市場と考えている。しかし、投資家はリスク回避も考え NuScale, Hyperion などの小型炉、TWR、燃料分野では Thor Energy, Thorenco, Lightbridge などに興味を持って調査してきて行動する情勢にある。

安全規制

- NRC 委員長が、1) 原子炉規制で培ってきた科学的技術的な規制の手法とツール (例えば、教訓の反映法、被規制者のパフォーマンス評価法) を今後、燃料サイクル、セキュリティ、新型炉レビューといった分野に広げてゆく必要の有る事、2)

公衆の規制への信頼を高める為に原子力施設周辺住民の癌に関する疫学的調査を再度行うことを全米科学アカデミーに依頼した事、3)最初の COL 発給は 2012 年との見通しを発表した。2)は 20 年前に行われた調査のアップデートで今回は癌による死亡だけでなく発生事例も含め集団線量を考慮しながら行うとした。これについては、石炭火力は多量の放射性物質を放出するから評価に含めるべきとの意見が参加者から出された。

- NRC 委員に新たに就任した Apostolakis 委員は、1)規制は独立性、公開、効率性、明瞭である事、信頼できるものである事の 5 点が重要とした上で、2)リスク情報を軸にしながらも不確かさの問題から決定論的手法をバランスよく適用し意思決定することの重要性を述べた。リスク情報活用の例として、ASME Section IX による現行 ISI が如何に費用対効果が悪く無用な被ばくを招いているかを説明し、今後リスク情報に基き 10CFR50.46 (ECCS 基準)を変更し想定配管破断サイズを 10(-5)発生頻度相当 (Transition Break Size) と最大サイズの 2 つを設定し異なった許容基準を適用する考えであることと、ここで不確かさへの配慮がどのように考えられているかを明らかにした。
- 元 NRC 委員長の N. Diaz は原子力発電を開始して 50 年以上経過の今日でも、原子力発電所建設には政権の安定とインフラと財政的基礎が重要な点は何も変わっていないが、原子力導入を考えている新興国ではその重要性が良く認識されていないとの所見を述べた。また、規制は安全運転を現実のものにすることでエネルギー需要を満たすという形で公益に奉仕するとの考えを述べた。
- UAE の規制当局 FANR は、1)今まで責任部署が幾つかの省庁に分散していたセキュリティ、セーフガード、放射線安全を炉規制と一緒に統合し統一的な考えで規制を行う体制にした事、2)スタッフも 2012 年には 165 名に増加させ (現在 90 名) 次第に UAE 国籍の人間の割合を増加させる方針である事、3)APR1400 の安全審査にあたっては炉心溶融時のデブリ冷却や航空機落下など重要な安全問題には海外 TSO の見解を求める事を示した。
- 韓国の KINS は、1)UAE 規制当局の個別要求に応じて設計を変更する用意の有る事、2)EUR-APR1400 では炉心溶融時のデブリ冷却や航空機落下や N+2 設計などにつき欧州基準 EUR に応じて変更する事、3)開発途上国向けに IRISS(Integrated Regulatory Information Support Service)を開始した事を明らかにした。なお、相手国の要求によって設計を変更することは AREVA, WH では良しとしていないが、日本と韓国は柔軟性を示し逆に二重基準はおかしいと批判する人もいる (例 UAE)。なお、韓国規制当局も NRC のいう規制の 5 条件を語りこれを CORE! (Competence, Openness, Reliability, Efficiency, Independence) と名づけてスローガン化していると語っていた。

燃料サイクル

- CEA は軽水炉から 2040 年には商業用高速炉の利用によりウラン必要量を年間

1GWe あたり 200Ton から 1Ton に低下させるべく、それ以前の 2020 年にはプロトタイプ炉を運転開始し MOX 炉心に少量の minor actinide を入れるという従来からの路線を説明。そのために、2012 年には炉設計オプションを選択し、GANEX デモ試験（日本を含めた GACID 計画による minor actinide 入り燃料の照射試験）開始が必要としていると説明。

- AREVA 社は、米国市場向けにまず 800 Ton/年の再処理工場を PFI で建設して得られた Pu を軽水炉で利用し平行して第四世代炉の開発という段階的なアプローチを提案している。問題は 40CFR190 による Kr 放出規制で、これに合致するには費用のかかる Kr 捕捉技術を用いるか 50 年以上冷却した使用済燃料を主体として再処理を行うかいずれかが必要と考えている。
- MIT(Foresberg)は、現在の米国では使用済燃料管理と燃料サイクルは分離されているが、将来は 2 つを結合させる必要があるとの考えを示し、如何に（例えば燃料製造から再処理まで一体化した施設を原子炉に併設）結合させるかいくつかの案を検討中と説明。
- 一方、同じ MIT の別のグループ(Kazimi)では、第四世代炉＋サイクルが市場にタイムリーに入る為には、経済性の観点で大きな工夫が必要と考えている。そのための方策として、使用済燃料中のウランと Pu は資源化せず（軽水炉むけ再処理および MOX 燃料加工施設は設置しない）、ロシアのように濃縮ウラン炉心で高速炉運転を開始しサイクルは高速炉再処理に限定する方式を考案。7 月半ばに CSIS(Center for Strategic and International Studies)より発表の予定。

原子炉による水素生産

- Entergy では所有の Waterford 原子力発電所の近傍を水素ガス配管が走り周辺の石油精製工場などに水素を供給しているので、原子力発電所で生産した水素をこの配管に繋げる構想を追求してきた。
- しかし、水素生産法の内、I-S プロセスにおける進展が少ない一方、高温水蒸気電解で優れた実績がでてきたことから、I-S プロセスは最近では中国日本韓国以外では沈静化してきている模様。また一般的な水素生産技術開発もガスを材料にした固体電解質燃料電池(SOFC)の利用に傾いて来た。2021 年の運転開始を計画している NGNP も高温水蒸気電解による水素生産を念頭に置いている。
- カナダは、負荷が少ない時の電力を用いて電解法で水素を作る事を主体に検討。
- ANS 年会に併設の会議としては非常に少人数の会議だった。

第四世代炉開発

- 超臨界 CO₂ による Brayton サイクル開発の進捗状況を各国から発表。超臨界 CO₂ による Brayton サイクルは第四世代炉の 2 次系におけるオプションの一つ(JAEA も実験を含めた評価実施)だが、他にも各種の用途が考えられていて、SNL, CEA, JAEA, KAERI などで一部は共同で一部は独立して研究が進められており、2009 年

度には合計 5M\$の研究費が使われた。研究は、使用機器材料の評価と Na-CO₂ 反応の評価が中心。

- 超臨界 CO₂ による Brayton サイクル利用により、ナトリウム-水反応を避けること、システム小型化と熱効率向上による経済性向上が期待されている。
- Na-CO₂ 反応は、Na₂CO₃ 生成と Na+CO 反応の 2 段階で進むので反応に遅れが生じ、かつ、460 度 C 以下では反応がマイルドであることから、ナトリウム-水の場合よりは反応に伴うエネルギーと確率が緩和される（どの位置で Na 漏洩があるか次第）ことが明らかにされた。
- Pb-Bi 炉では、ADS Myrrha が EURATOM の FP-7 での研究を通じて臨界モードと未臨界モード(ADS)でのいずれでも実験ができる高速中性子実験施設 FASTEF に変質した事を発表。
- 米国は Pb 冷却炉として欧州の ELSY (European lead Cooled System) の主要設計を取り入れた DEMO Pb-冷却炉を ANL で建設の計画を発表。

食品照射

- FDA の担当官、大学、研究機関等からの発表に依れば、
 - a) 照射によって改善される点は 1) 保存期間(shelf-life)の長期化：保管と輸送の未発達から今日世界で生産された食料の 1/4 は食用に供されないで失われており、開発途上国で顕著。人口増に備えロス無くす事自体が増産と同じ意味をもつ。照射は冷凍や加熱処理同様に保管期間の長期化に寄与、2) 食べ物に起因する食中毒を減らすこと (E. Coli 0-157 やサルモネラ菌による食中毒は先進国でも発生)
 - b) 照射は 1K Gy 以下で消毒(disinfection)と発芽防止と完熟遅延、1-10K Gy で保存期間(shelf-life)の長期化(微生物の減少)と病原体の除去(pathogen elimination)、10-50K Gy で滅菌(sterilization)を、養分を変質させる事無く可能にする。
 - c) 今日、ポテト、玉葱、穀物、アルファルファ、人参、レタス、メロン、パイナップル、香辛料、魚、食肉さらにはエビ、餃子、ブルゴギなどの食料にも広がっている。
 - d) 懸念は、食料自体の放射化、毒性物質の発生、養分の消失について持たれたが、実験動物に照射食品を食べさせる膨大な数の研究がなされて来た。近年、家禽類の肉への 10k Gy を超える照射への要望も高まったので、WHO, FAO, IAEA は合同で検討して 1997 年に 10k Gy を照射上限とした 1980 年の WHO 基準を改定して 10k Gy を超える照射への道を開いた。
 - e) 全ての食品に付いて一律な基準は設定できず、脂肪の含有量などに配慮し個別に審議する必要がある。食品間の必要照射量には 100 倍の開きがある。酸素の存在など照射条件にも配慮必要。
 - f) 食品への放射線照射はガンマ線、X 線、電子ビームがあるが、多くはガンマ線によって世界各地で行われており、適用範囲と量は拡大傾向にある。電子ビームを用いた移動式照射装置も最近開発された。
 - g) 2010 年 2 月の GAO 報告 (FDA の認可プロセスにおける透明性向上) も紹介された

- 日本で放射線特有の分解生成物として問題視する意見の出ている 2-アルキルシクロブタノン(2-ACB)問題について個別に意見を聞いたところ、a)FDA の担当者は、実際の照射条件の下では発生量は無視できると述べ、b)微生物学者は、1)2005 年のエビや蟹への照射認可において ACB 問題や INN 報告などについて包括的な評価がなされ、2008 年に FDA が脂肪量のため ACB 発生量の少ないほうれん草やレタスへの照射を認可するルールでも 2-ACB は食品照射を制限するに足る健康問題ではないという判断を示していること、2)中国や米国で食品照射は増加傾向にあり、日本の規制（馬鈴薯の発芽防止以外は禁止）は将来非関税障壁問題を惹起しかねないと語った。
- 0-157 やサルモネラ菌による食中毒の一層の防止、保存期間長期化への期待、を背景に、食品照射を如何に拡大してゆくかの方策に関する論議があった。1)消費者の誤解と懸念を除くように低学年の時から食品安全教育を行う事、2)そのような長期を要する方策だけではなく、むしろ、消費者は安全を求め、小売り業者は shelf-life の長いことを求めるその両者を満足させるビジネスモデルを立てて、どの段階でどの業者と組んで食品照射を進めるか検討するのが重要、3)ANS が様々なワークショップを開催して啓発にあたる、といった方策案が出された。

これらの知見に基づき、今後、我が国においても以下のような点について更に検討が必要との所感をもった。

- 小型モジュール炉の市場での成功条件とこれを考えた開発
- 規制による意思決定におけるリスク情報の一層の活用と規制活動 5 条件
- Brayton サイクル利用や FaCT 技術などに関する国際評価等を通じて、世界の動向を考慮しつつ国内 FR を世界標準設計の一つとする努力
- 放射線の食物照射における消費者と小売り業者ニーズ、GAO 報告を参考にした認可プロセスにおける透明性向上、ビジネスモデル構築

以上