



International Workshop on Nuclear Data Needs for Generation IV Nuclear Energy Systems に参加して

核燃料サイクル開発機構

原田 秀郎

harada@tokai.jnc.go.jp

武蔵工業大学

吉田 正

yos@ph.ns.musashi-tech.ac.jp

1. はじめに

第四世代炉 (Generation IV Nuclear Systems) とは、第一世代 (原子力開発初期の原型炉)、第二世代 (現行軽水炉等)、第三世代 (ABWR 等の改良型軽水炉) に続き、その高い安全性と経済性によって他のエネルギー源と十分競合できる次世代原子炉システムである。2001 年、米国の提唱により、日、仏、英、韓国、中国などを含む 10 カ国が国際フォーラム (GIF) をつくり、2030 年頃の実用化を目指して、その開発に向けた国際的な取り組みを行っている。第四世代炉の炉概念としては(1) 超臨界圧軽水冷却炉、(2) ナトリウム冷却高速炉、(3) 鉛合金冷却高速炉、(4) 超高温ガス炉、(5) ガス冷却高速炉、(6) 熔融塩炉、と多岐にわたる。また、各々の概念が複数の炉型を包含しているため、炉型としては全体でかなりの数にのぼる。一例をあげるなら、(3) の鉛合金冷却高速炉には、鉛冷却大型炉、鉛ビスマス冷却小型炉、鉛ビスマス冷却バッテリー炉の 3 炉型が含まれている。2030 年頃の実用を目指すだけあって、これまで予想もしなかった新奇な燃料や構造材を炉心に持ち込むような概念はない。しかし、例に挙げた鉛にしてもビスマスにしても、これまで臨界実験や実機における経験に裏打ちされた軽水やナトリウム並みに核データの信頼性を向上させるには、まだ大きな努力が要求されよう。

このような背景のもと、標記の会合が、European Commission Joint Research Centre のひとつである IRMM 研究所 (Institute for Reference Materials and Measurements) を幹事機関とし、US-DOE、European Commission、及びカナダの AECL の共催により、平成 17 年 4 月 5 日より 7 日までの 3 日間、ベルギーのアントワープで開催された。

2. アントワープ

ベルギーはヨーロッパでも古い歴史と文化を誇る地域である。西ヨーロッパ独自の文明が花開き始めた 12 世紀を過ぎると、イタリアにやや遅れて、現在のベルギーにほぼ重なるフランドルとその周辺の諸都市の興隆が始まる。ブリージュ、ゲント、イープルといった諸都市に商業が栄え、やがて音楽（フランドル楽派）や絵画（ファン・アイク兄弟、ファン・デル・ウェイデン、メムリンクなど）の分野でヨーロッパを先導するまでになる。フランドルの周辺にあるアントワープの繁栄の時代は、これにやや遅れ、15～16 世紀にやってきた。スヘルデ河をまたぐ河港として栄え、いまでもベルギー第 2 の都市として繁栄を誇る。現代のアントワープはダイヤモンド加工と、17 世紀にこの町で活躍した大画家ルーベンスに象徴される。ヨーロッパで最も美しいと言われる豪壮な鉄道駅から北に向かう歩行者天国の繁華街を 20 分ほど行くと、右手に、ルーベンス像が中央で睨みをきかず Groenplaats に出る。Groen と書いてフルン（広場）と読ませる。郷に行ったら、郷に従うしかない。その広場の右手奥に会場のアントワープヒルトン（写真）がある。これも豪壮な造りで、国際会議特別料金ででもないとなかなか泊まれる格のホテルではない。



3. ワークショップ

今回のワークショップでは、核データの誤差が原子力システムの設計におよぼす影響、核データファイルに組み込むための誤差ファイル（共分散ファイル）、及び核データ測定を縦糸に、第四世代炉（以下 Gen-IV と略記）を横糸に、議論が行われたと要約できよう。

第四世代炉がまだ具体的な設計の段階に達していないため、横糸がやや弱いとの感が否めなかったが、これらの分野の専門家が一同に会し、情報の交換を行った意義は大きい。出席者は約 70 名で、内訳はフランス 20 名、米国 14 名、ベルギー 8 名、ドイツ 5 名、日本、ロシア、オランダ各 3 名、韓国、ルーマニア、英国、IAEA、OECD/NEA 各 2 名、イタリア、カナダ、フィンランド、チェコ、メキシコ各 1 名であった。日本からは本稿の筆者 2 名の他に片倉純一氏（原研）が出席した。また、4 月 8 日には、本ワークショップ主催で、IRMM 研究所及びベルギー原子力研究所（SCK CEN）にて、核データ測定施設、研究炉、及び深地層研究施設の施設見学があった。

第四世代原子力システム開発に向けて、DOE と Euratom の合意が 1 年前に締結され、欧州各国も本格的な取り組みを開始しようとしている。欧米では、革新的な原子力システムの開発に当たっては核データが重要であることが正しく認識されている。だからこそ、今回のような会議が持たれたのであるが、核データの測定者から、実際の原子力システムの設計者まで一同に会して議論でき、大変有益なワークショップであった。我が国においても基礎研究とプロジェクト研究の相互フィードバックの必要性がますます高まるであろうというのが実感である。

4. 各発表の要旨

ワークショップでは、三日間、朝 9 時から夕方 6 時まで活発な議論が行なわれた。主要な発表について、以下にその要点を記する。

ANL の P. Finck 氏 「原子力の将来と核データの役割」

- ① Gen-IV のような新しい核データニーズに対応するためには、従来の時間と予算のかかる方法（アドジャストメント、バイアス法、モックアップ試験）ではなく、基礎的な核データ測定から積み上げる方法に転換する必要がある。
- ② 原子力開発の鍵は、経済性、安全性、核不拡散、廃棄物、U の供給だ。最後の 2 つは、原子力の持続性の観点で重要であり、現在のワンスルーではなくクローズドサイクルのための革新技術が必要だ。
- ③ LWR の高燃焼度化は、経済性向上で重要だ。Am-241、243、Cm-242、244、U-236、Pu-242 の中性子捕獲断面積の影響が大きい。
- ④ 高温グラファイト炉では、U-235、238、Pu-239、240 の核データが臨界度の誤差を小さくするために重要だ。
- ⑤ 核データの整備は、単発的なものではなく、系統的に進めるべきだ。

ANL の T. Taiwo 氏 「Gen-IV 原子力システムのための核データニーズ 米国 WS 総括」

- ① Gen-IV のための核データニーズに関する会議が 2003 年 4 月に米国の BNL 研究所(参

加者 約 30 名) で行なわれた。

- ② 6 つの Gen-IV 原子力システムを紹介。
- ③ Si(SiC)が反射材、構造材として提案されている。
- ④ Pu-241、242 の中性子捕獲断面積で大きなデータ間の差異が指摘された。
- ⑤ CEA の Salvatores コメント：Gen-IV の枠組みで国際協力を進めるにはここ数ヶ月が重要な時期だ。

CEA の G. Rimpault 氏 「Gen-IV 原子力システム選定のための核データニーズ」

- ① Gen-IV システムの内、4 つは高速炉であるが、従来型の高速炉に比べて高性能を追求しているために炉心の解析は緒に着いたばかり。この点で、中性子輸送計算と核データに新しい課題を与える。
- ② Pu-239 の核分裂断面積に関する設計側からの要求精度は非常に高いため、微分データだけでは不十分で積分実験との組み合わせが必要だ。

CEA の R. Jacqmin 氏 「GFR 実験の解析と新しい積分実験の提案」

- ① CEA の検討を進めている高温ヘリウムガス冷却炉は、炉心に多くの C を含むため、通常の高速度炉炉心とは中性子スペクトルが異なる。このため GFR 炉心を解析する中性子輸送コードの検証が必要だ。

Stuttgart 大学の W. Bernnat 氏 「中性子輸送計算における炭素と水に対する中性子散乱則について」

- ① 熱中性子に対する炭素と水に対する中性子散乱則の再評価を HTR と SCWR の炉心解析に資するために行い、既存実験データとの比較を行なった。ファクター2程度の差異もあった。また、実験データは 600 K までしか存在せず、高温でのデータは今後の課題である。
- ② 超臨界水の蒸気に対する散乱則が必要だ。これまでの散乱則には、誤差が与えられていないという問題がある。

CEA の M. Salvatores 氏 (原稿提出時所属は、ANL) 「核データの誤差が革新的原子炉及び燃料サイクルの性能パラメータに与える敏感さについて」

- ① 核データの誤差は、以下の性能パラメータに影響する。
臨界度、ドップラー係数、冷却材のボイド係数、燃焼中の反応度損失、核変換性能、ピーク発熱、貯蔵中の MA の崩壊熱、燃料取出時の放射線強度、放射線毒性
- ② 核データライブラリーの誤差は、MA と構造材に対してだけ整備されたが、FP の誤差整備は今後の課題。
- ③ 誤差の評価は、ANL が実施した結果は、NEA の結果に比較してずっと大きい。ANL

は、物理的な考察により誤差を大きく評価したとのこと。

- ④ 各核種に対して、各中性子エネルギー毎にどのくらいの誤差があるかを示した。
- ⑤ どれだけ誤差を減らせば、どういう恩恵があるかを定量的に示すことが核データ測定を推進するために重要だ。

NRG Petten の A. Koning 氏 「核モデルを用いた誤差の計算」

- ① 従来の核断面積の計算コードは、計算結果に誤差を与えてこなかった。彼の開発した核断面積計算コード TALYS のインプットパラメーターをモンテカルロ法で振ることにより誤差の評価を行なえるようにした。今後検証には、時間がかかると想像するが、大変すばらしい試みである。
- ② 他の発表より、欧州の実験データの多くは既に TALYS コードとの比較が行なわれていることがわかる。

CEA の G. Norguere 氏 「Gen-IV ための核データ評価」

- ① MA と FP の核データ評価を CEA カダラッシュの核データグループで実施している。Am-241 から Am-242 へのアイソマー比計算には、TALYS コードで改善された準位密度が必要。逆に言うと、アイソマー比の測定より、スピン依存の準位密度が決まる。
- ② TC-99 と I-129 の熱中性子捕獲断面積の評価を行なっている。JNC の測定とヨーロッパの測定で差異があるので、その原因について教えてほしいとの希望が休憩時間中の議論であった。

Idaho (INL) の D.W. Nigg 氏 「ANL のパルス中性子源を用いた核データ測定への INL の能力」

- ① ANL には、IPNS (Intense Pulsed Neutron Source) というロスアラモスの LANSCE に匹敵する施設がある。INL の核物理グループは、本施設で 12 台の BGO 付 Ge 検出器を用いた研究を行なってきたおり、本装置に中性子検出器を追加することにより核分裂チャンネル毎に中性子多重度を求めることが出来ることを提案した。サンプル供給能力もある。熱から MeV まで測定可能。ビーム強度は、 3×10^{12} p/pulse、30 pulse/sec、70ns proton width、 ^{238}U ターゲット使用。

IRMM の A. Plompen 氏 「高速中性子領域での断面積測定」

- ① 第四世代炉では、3 つの高速炉システムを検討しており、高速中性子に対する断面積が重要だ。 $(n, n'\gamma)$ 断面積の測定には、Ge 検出器の利用が有効だ。Ge のデータ収集用に F-ADC 測定システムを開発し、信号あたりの不感時間として 2.5 マイクロ秒以下を達成した。

CENBG の G. Barreau 氏 「トランスファー反応を利用した短寿命 MA の核分裂断面積測定」

- ① He-3 などのビームによるトランスファー反応を利用し、通常であれば測定が不可能な短寿命核種の核分裂断面積が決定できることを半減期 27 日の Pa-233 の場合に実証できたと報告した。この方法は、サイクル機構、甲南大学及び産総研が共同で進めている逆反応（光核反応）を用いた短寿命核の中性子捕獲断面積決定に関する研究と同様に革新的な方法であり、今後の短寿命核種の断面積測定に強力なツールとなるであろう。

参考文献：NIM A511 (2003) 388-399.

ITU の D. Haas 氏 「MA 核変換のための革新的燃料」

- ① 150g の Am を扱える MA 燃料製造施設が 2004 年の 7 月より稼動を始めた。8 ピンを製造した。参考文献：J. Nucl. Mat. 319 (2003) 44. ibid. 320 (2003) 11.

JNC の原田 「JNC と京都大学グループによる MA 中性子捕獲断面積の最近の測定」

- ① Np-237、238 の熱中性子捕獲断面積測定、Np-237 の中性子捕獲断面積のエネルギー依存性測定結果について報告した（写真）。微分データを測定する立場より実験の誤差及び現状データの問題点について議論した。
- ② 研究の枠組み、放射化法での中性子モニターに関する質問、TOF 測定における検出効率のエネルギー依存性に関する技術的な質問、欧州でも最近 Np-237 の中性子捕獲断面積を測定したので比較できるとの提案など 8 つの質疑があった。今後、真のデータを決定するために国際的な専門家間の情報交換が重要と主張した。



5. 施設見学

シンポジウム四日目に IRMM 研究所での核データ測定施設として活躍中の電子線加速器施設及びタンデム加速器施設を見学会があり、原田が参加した。また、ベルギーの原子力研究所 (SCK CEN) にて、研究炉 BG1、及び深地層研究施設の施設も見学することができた。

(1) IRMM の電子線加速器施設

40 年近く経過した古い電子線加速器であるが、最大 400 m の飛行距離と電子線パルスの時間分解能が良いという強みを生かして現役で稼動している。写真はそのフライトパスである。さらに、予算を投入し、ターゲット系の改良を行い時間分解能をさらに向上 (ターゲット半径を小さくする) させる計画がある。

写真は、飛行距離の短い (9m) 測定室に 3 台の C_6D_6 検出器を設置した様子である。手前に 5 cm 厚の鉛ブロックを広い面積にわたり積み上げている。この背面には、厚さ約 50 cm の LiC (約 50%) 入りパラフィンブロックが積み上げられている。



(2) IRMM のタンデム加速器施設

本装置は、45 年経過しており、維持費はないが動かせるだけ動かすとのことであった。ターゲットと加速エネルギーを変更することにより広範囲の単色中性子を発生することが出来る。

(3) 原子力研究所（SCK CEN）の深地層研究施設（Euridice）

地下 223 m にある深地層研究施設。トンネル内には、簡単な装置があるだけであるが、放射能の深地層中の移動に関する研究などユニークな研究が行なわれている。

SCK CEN は、ベルギーにおける原子力大学院の役割を果たしているそうである。各大学では、原子力工学科を維持することが出来ないために、大学院学生の教育を各大学の教授が出張授業で実施しているとのことである。



6. おわりに

もともとフランスの出で、その後ANLに移ったFinck氏のシンポジウムでの発言「新しい核データニーズに対応するためには、従来の、時間と予算のかかる方法（アジャストメント、バイアス法、モックアップ試験）ではなく、基礎的な核データ測定から積み上げる方法に転換する必要がある」は興味深い。写真は、シンポジウム会場の窓から写したアントワープ大聖堂である。奥の鐘楼は高さ123メートルの偉容を誇る。1521年の完成まで2世紀を要したとあるが、手前の鐘楼は未完成のまま残された。いま見るとその非対称性がかえって美しい。このような、何世代にもわたる着実な努力の積み上げはヨーロッパの得意技であり、その文化の本質の一部である。Finck氏の発言にそのような壮大な発想の一端を見る思いがした。

