

話題・解説(I)

日米協働による JUPITER 実験詳細データの発掘

日本原子力研究開発機構
石川 眞、池上 哲雄
ishikawa.makoto@jaea.go.jp
ikegami.tetsuo@jaea.go.jp
(株) NESI
三田 敏男
sanda-t@nesi.co.jp

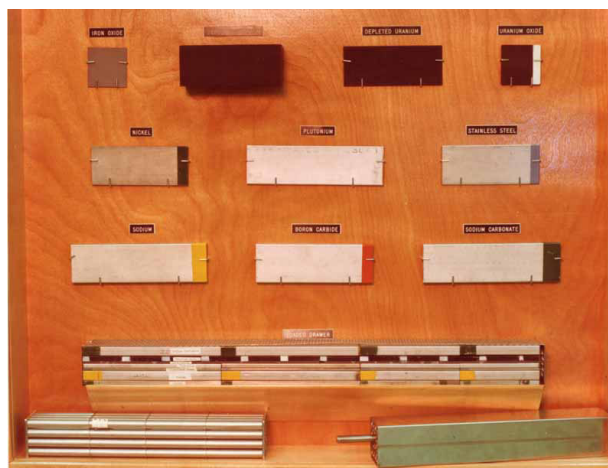
1. はじめに

JUPITER プロジェクト (Japanese-United States Program of Integral Tests and Experimental Researches) とは、旧動燃事業団 (現原子力機構) と米国エネルギー省 (DOE) との共同研究として 1978～1988 年にかけて実施された一連の大型高速増殖炉の炉心臨界実験です。本プロジェクトは、大型高速増殖炉心の核設計手法・核データの評価に必要な情報を得ることを目的として、米国アルゴンヌ国立研究所西部 (ANL-West、現アイダホ国立研究所 (INL)) の、Pu 約 3 トンを有する高速炉心臨界実験装置 ZPPR (写真 1 を参照) を用いて実験が行われました。ZPPR は水平二分割型臨界実験装置であり、2 インチ×2 インチのマトリックスからなる集合体に、燃料・構造材・冷却材模擬プレートを組み合わせたドロワ (写真 2 を



(写真 1) 米国 ANL-West の ZPPR 臨界実験装

参照)を各マトリックスに挿入して、実験炉心を構成します。この JUPITER 実験データは、60~100 万 kWe 級の炉心サイズをカバーする人類史上最大の高速炉心臨界実験であること、均質炉心の他に径非均質・軸非均質炉心や制御棒引抜・挿入状態など非常に多様な実験仕様（計 4 シリーズ、21 炉心）を有すること、修正中性子源増倍法による反応度測定や、箔による U-238 捕獲/Pu-239 核分裂反応率比の測定、Oscillation



(写真 2) ZPPR に装荷するドロウと模擬プレート

法によるサンプルドプラー反応度測定など、当時の世界で最高レベルの測定技術を駆使した臨界実験であることなどから、現在に至るまで、高速炉炉物理研究及び炉心設計のための最大の基本データベースとして、世界中で活用されています。

一方、OECD/NEA の炉物理活動として、「国際炉物理ベンチマーク実験」プロジェクト (International Reactor Physics Benchmark Experiments Project : IRPhE) が、現在、非常に精力的に推進されています。IRPhE プロジェクトの目的は、世界で過去に実施された炉物理実験データ（軽水炉、高速炉、ガス炉などの各種炉型を含みます。また、臨界実験だけでなく、実機データも対象とします）を、後世の核データ検証・改良や炉物理解析モデルの開発に役立てるために、高品質な実験情報とベンチマークモデルを組み合わせた形で、公開のデータベースとして確立することです。このプロジェクトは、それ以前に整備が開始され非常に成功を収めた

「国際臨界安全ベンチマーク評価」プロジェクト (International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project : ICSBEP) を踏まえたものであり、ICSBEP が臨界性だけを扱っているのに対し、本 IRPhE は、臨界性に加えて、反応率や反応度など広範な炉物理パラメータを対象としているので、炉心設計への反映の観点から非常に重要な意義があります。さらに、1996 年に動燃事業団からの提案に対して米国 DOE が合意した結果、JUPITER 実験の情報



(写真 3) IRPhE ベンチマークの初版 DVD

については、プレート毎の組成に至るまで、動燃の公開報告書などで完全に公開できていることも、今後、原子炉の許認可等で要求されるであろう設計のバックグラウンドとなる実験データの透明性・再現可能性・説明責任などの観点から、非常に望ましいことです（IRPhE プロジェクトの最新情報に関心がある方はぜひ、<http://www.nea.fr/html/dbprog/IRPhE-latest.htm> をご覧下さい）。

原子力機構は、これまでに、高速実験炉「常陽」MK-I 炉物理性能試験、DCA 重水臨界実験とともに、JUPITER 実験のひとつ（ZPPR-10A 臨界実験、60 万 kWe 級二領域均質炉心の制御棒引抜状態（運転サイクル末期模擬））をベンチマークとして整備し、IRPhE プロジェクトに登録提案をしました。しかし、前述の 2 件は優れたベンチマークであるとして採択され DVD で正式に世界に公開されましたが、この ZPPR-10A 実験ベンチマークは、その実験情報（炉心の詳細構成や実験誤差など）が、IRPhE の基準からみて不足していると判断され、現在ペンディング（ドラフト）状態となっています。原子力機構は、これらの不足している詳細実験情報を、当時の日米共同研究期間に入手できていなかったため、IRPhE の技術審査を通過する品質のベンチマークに改良するためには、米国からの情報提供または協働作業がなければ不可能な状況です。ですから原子力機構は数年前から、米国に JUPITER 実験ベンチマークを IRPhE に登録するための協働作業を申し入れてきましたが、米国側は高速炉研究のための予算とマンパワーがないという理由で、これまで受け入れてくれませんでした。

ところが最近、米国内で、核燃料サイクル路線及び高速炉建設再開の機運（AFCI 及び GNEP プロジェクト）が起こったことから、昨年 11 月によく、米国側から「DOE 予算がついたので協働作業を行おう」との提案を受けることができました。

長くなりましたが、これが今回報告する米国と原子力機構の協働作業の背景です。

2. 協働作業の内容

協働作業は本年 3 月に、米国アイダホ州 Idaho Falls 市にある INL のオフィスビルで実施されました。原子力機構からは、石川（原子力機構側の窓口）・

ZPPR Operating Log V.17
(To be completed for each startup) 17

Date 5/25/78 Assembly No. 9 Loading No. 13 Run No. 17
 Total Fissile Mat. 196.6 kg: Fissile Pu 195.258 kg: Core Drawers 2762
 Total Safety Rod Worth: 1.58 $\Delta k/k$.
 Experiments to be Performed: operational maintenance

Reactor power trip settings: Ch. 5 8×10^7 amps. Ch. 6 8×10^7 amps.
 Core temperature at startup: TC-1 22 °C. TC-2 25 °C.
 Cooling-air flow rate at startup: Half 1 1850 ft/min. Half 2 1700 ft/min
 Safety-rod latch power at 18 ± 2v & table drive clutch at 24 ± 2v YES.
 Daily checkout completed YES.

THIS SECTION TO BE COMPLETED BY THE REACTOR SUPERVISOR

Cell inspected & cleared . Maintenance & Modification Log reviewed
 Operating Log reviewed for anomalies . Bypass Log reviewed
 Red Tag Log reviewed . Yellow Tag Log reviewed
 Daily Checkout Log reviewed . Weekly Checkout Log reviewed
 Monthly Checkout Log reviewed

Startup Time: 1325

Reactor Operators	Initials	<u>BLA</u>					
	In/Out	<u>1325</u>					
Reactor Supervisors	Initials	<u>BLA</u>	<u>BLA</u>				
	In/Out	<u>1329</u>	<u>1325</u>				

Table Closure Indication: 1. - 24.8 2. - 38.3 3. - 67.3 4. - 9.4

Time (hr)	Power (watts)	Ch. 7 Ch. 8 (Amps)	SR-1	SR-2	SR-3	SR-4	SR-5	SR-6	Exp. Proc Ch. #1
1415	7	1.5×10^{-7} 1.6×10^{-7}	act	act	act	act	23.845	11	$.95 \times 10^{-7}$

Measured Excess Reactivity: .04 $\Delta k/k$.
 Reactor Scrams and Reasons: #6 on ch 6 for weekly 0.8x10⁸
 Shutdown Time 1604 hr. Table Separated YES. Reactor Shields In YES.
 Safety Rods in Scrammed Position YES. Cell Ventilation Normal YES.
 Integrated Power (watt-hr): This run 13 Total to Date 659306.

Fig. V.1 Rev. 12/76.

(図 1) ZPPR 装置の運転日誌 (ZPPR-9 臨界日)

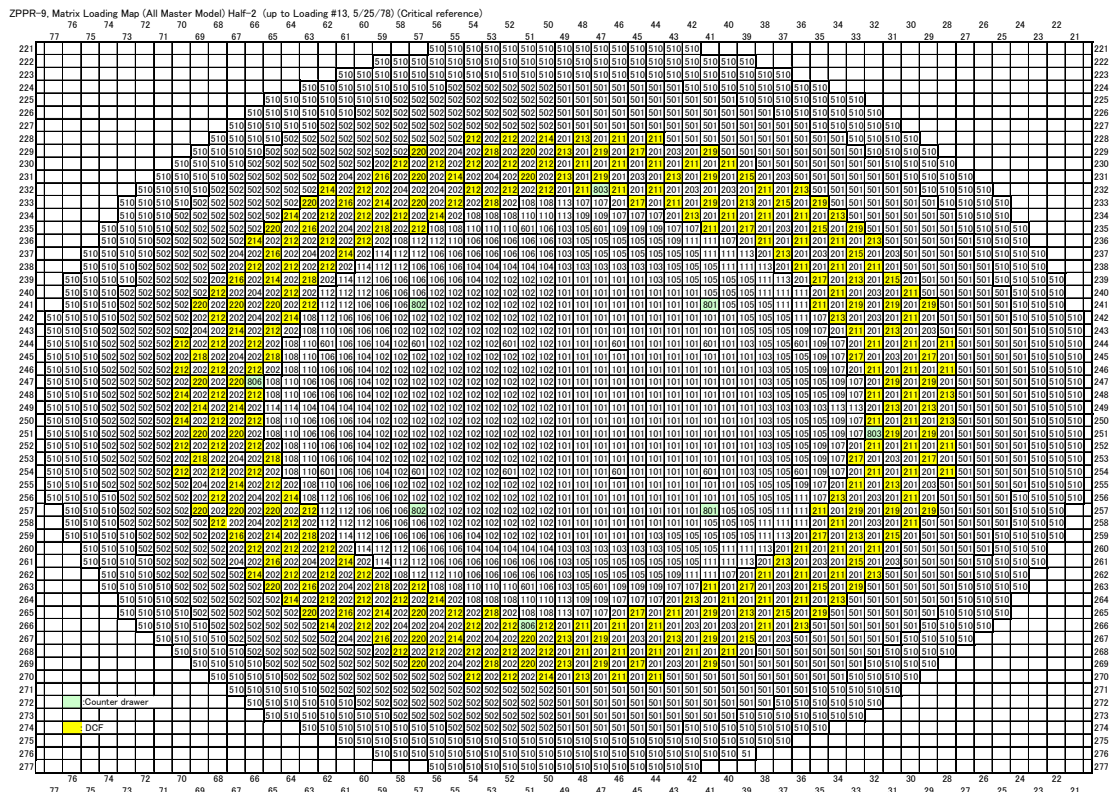
JUPITER 共同研究時代に入手した全ての実験報告書(ZPR-TM レポート)、燃料交換記録、燃料ドロウ内プレート配置図(ただし不完全なものですが)、及びこれまで原子力機構が独自に収集した JUPITER 実験関連の全ての公開文献を、スキャナで pdf ファイルとし INL に提供しました。これで、米国と原子力機構は、協働作業のための基礎材料を全て共有したことになります。

今回の協働作業の内容は、正直に申し上げて、肉体的には非常に苦痛に満ちたものでした。30 年前の手書きの燃料交換記録を一行ずつ解読し、それをもとに、ある ZPPR 実験炉心の燃料配置マップを一点ずつ記録していくのです。基本炉心である ZPPR-9 炉心(60 万 kWe 級二領域均質クリーン炉心)の場合には、炉心部だけで合計 2,962 ドロウ(径ブランケット部と反射体部を加えると計 5,234 ドロウ)あります。しかも、当時の燃料交換記録には、読めない文字や明らかな誤記(炉心の同じ位置で、装荷した記録のドロウと取り出したドロウの番号が異なるなど)が数多くあるので、ひとつひとつそれらの問題を解決していかなければなりません。日本からの 3 名と McKnight 氏は、INL のオフィスで机をならべ、問題点が発見されるごとに一点ずつ協議を行い解決していききました(なお、McKnight 氏は ANL シカゴのオフィスに、今回のデータベース構築のための要員を確保していたようで、頻りに電話で、ANL シカゴに保管されている実験情報の調査を命じていました)。

また、実験情報の収集に関しては、INL にも最大限の努力を払っていただきました。例えば、サンプルドプラー反応度測定に関しては、40 年前の青焼きコピーの設計図を見つけて持ってきていただき、承認サインに当時実験担当者の Kaiser 氏の名前を見つけ、その保管のよさに感激しました。残念ながら、我々が要求した資料とは異なりましたが、古い資料もよく保管されていることが認識できました。

3. 協働作業の成果

前節の作業を、McKnight 氏と石川は 1 週間、池上と三田は 2 週間、INL オフィスで行いました。その結果、JUPITER 実験炉心のうち、ZPPR-9 炉心、ZPPR-10A 炉心、ZPPR-18A 炉心、ZPPR-19B 炉心の 4 炉心に対しては、完全な as-built 実験情報を再現できることを確認しました。ここで、ZPPR-18A、19B 炉心は 100 万 kWe 級二領域均質炉心を模擬していますが、ZPPR の所有 Pu 量の制限から外側炉心の一部に濃縮 U を用いています。濃縮 U の配置は、前者はセクタ型、後者は Pu 混合型です。成果の例として図 4 に、ZPPR-9 実験の臨界レファレンス炉心の All Master Model (AMM) ドロウマップを示します。この AMM マップは、ZPPR-9 実験実施後 30 年経って、今回の日米協働作業により初めて再現することに成功したものです。従来は、ドロウ毎のマップ情報が無かったために、日米共同研究当時に作成された領域毎平均組成のみからなる近似モデルを用いて、炉心解析評価を行っていました。均質炉心であり核的結合度が比較的強いことから、ZPPR-9 炉心



(図4) ZPPR-9 臨界炉心の AMM マップ

における AMM 効果の影響は小さいと考えられますが、IRPhE では、ベンチマークモデルにおける as-built からの近似の影響が小さいことを定量的に証明することを求められているため、この AMM マップ情報は必須のものです。この AMM マップは電子化されて作成されているので、特殊なプログラムを作成することによって、人間の手を介することなく、自動的に拡散・輸送など各種の炉心計算コードの入力を生成することができます（この「自動化のための特殊なプログラム」とは、電子化された JUPITER 実験情報を「オブジェクト指向プログラミング」によって処理することを意味しています。原子力機構では、このシステムをまもなく完成し JUPITER データベースとともに公開します。この話題については、また別の機会にご報告したいと思ひます）。

現在、原子力機構は、米国と協力して、前述した ZPPR-10A 実験のベンチマークを完成し、IRPhE に再提出する作業を集中して行っています。また、ZPPR-9・ZPPR-18A・ZPPR-19B 実験についても、原子力機構独自にベンチマーク整備を行っており、同様に IRPhE の技術審査を受ける準備を進めています。

4. おわりに

JUPITER 実験が行われた ZPPR 装置は近く廃炉になるとのことであり、また JUPITER 実験に携わったほとんどの研究者が定年退職し、あと 1~2 年で ZPPR 装置の詳細を知る

人が米国にも皆無となる状況を考えると、今回が、JUPITER 実験の as-built 実験情報を再現する最後のチャンスでした。その意味では今回の共同作業は、米国及び原子力機構の両者にとって、ぎりぎり滑り込みセーフでしたが、とにかく貴重な炉物理実験データベースを歴史の彼方に消え失せさせずに済んだ点で、成功であったと思います。

米国は、JUPITER の運転記録などを全て提供するなど、今回の協働作業に真摯に対応してくれました。ただし、実験誤差に関する情報提供に関しては、存在するが提供できないのではなく、データそのものが残っていないことが分かりました。あるいは、仮にデータがどこかに埋もれているとしても、30 年前のデータであり、当時の実験関係者が去ったあとの現在の米国スタッフにはそれを見つけ出すのが困難であったということでしょう。セキュリティ管理が強化されており、我々外部の者が資料室に直接アクセスすることが許されない状況を考慮しますと、両者とも制限の中ではほぼベストを尽くしたと言えると思います。

JUPITER 実験が行われた 20~30 年前と比較して、その後の計算機及び解析手法の大幅な進歩により、100 万 KW 級の大型高速炉炉心も as-built 体系を直接そのまま解析可能となりました。JUPITER 時代は炉物理的近似度を可能な限り保ったままで、as-built 体系をいかに簡略化したモデルにするかが解析者の腕の見せ所でした。従って、簡略化したモデルに適合する実験情報が得られれば十分であったのです。as-built 体系を直接そのまま解析しようとする現在の解析手法にとっては、当時の実験情報のみでは不十分になってきたということで、実験者と解析者の協力関係の重要性を再認識するよい機会となりました。また、当時は実験誤差の重要性に対する認識も、現在と比較してかなり薄かったように思われます。古い実験ほど実験誤差の再評価が難しくなっているのが現状なのかもしれません。

なお、今回の協働作業期間中に、Briggs 氏の好意で、ZPPR 実験装置があるサイト (Idaho Falls 市内から西へ約 50km) を訪問する機会 (写真 4 を参照) が与えられました。最近の核不拡散政策のためか、警備がものすごく厳しく、機関銃を持った多くの警備員に見張られながら 3 箇所ものボディチェックのある炉室への通路を通過しなければなりませんでしたが、目の前に見る ZPPR 装置の巨大さはやはり圧巻でした。個人的な話になりますが、石川にとって今回実現した ZPPR 施設訪問は、20 年来、ZPPR 実験の解析評価を行いながら、実物を見る機会が無かったので、実に感動的なものがありました。また、池上・三田にとっても、派遣員として青春の一時期過ごした場所を、深い感慨をもって訪れることになりました。



(写真 4) ZPPR 高速炉心臨界実験装置の建家 (米国 Idaho 州)

(以上)