

<原子力学会賞受賞記念寄稿>

海外機関との協力による高速炉核設計・炉物理の基盤確立

—MOZART 計画および JUPITER 計画—

日本原子力研究開発機構 中島文明

1. はじめに

1970年代初め、欧米の高速炉開発先進国は実験炉を運転し、より大型の原型炉建設へと向かっていた。一方、欧米に追い付こうと日本は官民を挙げて原子力に取組み、高速炉では実験炉(常陽)の建設と原型炉開発に着手したところであった。このような状況にあって、1967年FCAが初臨界となり、併行して常陽の設計解析手法や核データの整備が進められていたが、原型炉の自主技術による開発を目指すには2000lクラスのプルトニウム炉心の臨界実験が不可欠と認識され、動力炉・核燃料開発事業団は英国原子力公社との国際協力による模擬臨界実験を実施した。引き続いて、大型化する実証炉などの炉心概念を固め、炉物理特性を把握するため、米国エネルギー省との国際協力に基づいた臨界実験が実施した。これらの計画は海外機関との共同の研究開発の走りであり、人材の現地への派遣や国内でのオールジャパンの体制を構築など、原子力開発黎明期の取り組みとして、高速炉物理の技術の発展と人材の育成に役立ったものとする。

2. MOZART 計画¹⁾

我が国の臨界実験装置FCAではPu量と装置の大きさから高速増殖原型炉「もんじゅ」(280MWe)炉心のフルモックアップ実験が実施できないため、当時利用可能であった英国原子力公社Winfrith研究所のZEBRA臨界集合体を用いた国際協力による臨界実験MOZART計画(Monju Zebra Assembly Reactor Test)が実施された。

本計画では、MZA炉心、MZB炉心、MZC炉心のシリーズ実験で構成され、これ等の模擬炉心に対して、臨界量(実効増倍率)、制御棒反応度、反応率(出力)分布、Naボイド反応度、サンプル反応度等が測定された(表1)。

MZ-A炉心は「もんじゅ」の外側炉心を模擬した組成を持ち、炉心高さ対直径(H/D)比が0.99で、球形に近い1領域炉心であり模擬制御棒領域を持たないクリーン炉心である。炉心形状が簡単で球形モデルで良く近似できるので計算上の曖昧さが少なく、核断面積検討など炉物理上の基礎的な研究に適している。例えば、炉心中心における中性子スペクトルをTOF法や陽子反跳法により測定している。

MZ-B炉心は「もんじゅ」の2領域均質炉心を模擬し内側・外側炉心領域からなり、ブランケット組成の違いによってMZ-B(1)、-B(2)、-B(3)に分かれており、各々天然Uセクタ、劣化Uセクタ、天然U円筒ブランケットをもっている。これらのMZ-B炉心は「もんじゅ」のクリーン炉心における各種の特性量の測定とブランケット組成の違いによる特性量の空間分布の違いをみるため計画した。MZ-B(4)はMZ-Cの標準炉心であり反応度スケールの実験が行われた。MZ-B炉心は炉心体積が約1800lであり「もんじゅ」の約2300

れよりやや小さい。

MZ-C 炉心は MZ-B (4) 炉心に「もんじゅ」模擬制御棒を挿入した炉心であり、模擬制御棒挿入に伴う臨界量の不足を外側炉心燃料の追加で補っている。この炉心での測定は制御棒の挿入・引抜に伴う反応率分布の変化が測定されており、直接的に設計に反映できるデータが得られている。

得られた実験データは、英国においては日本からの駐在者も含め英国手法で解析並びに解析手法の開発を行い、日本国内においては MOZART 検討会を中心に国内手法による解析を実施した。

反応率分布の測定と解析の結果の例を図3に示す。MZ-B 炉心体系の炉心部では計算値は約3%以内で実験値と一致しているが、ブランケットでは半径方向の測定位置に依存し、両者のずれは半径とともに開く傾向にある。この一因は構造材中の Fe の共鳴散乱の取扱いにあるとされた。つまりエネルギー群幅が広いと共鳴散乱の効果を精度よく表せず、この効果を取り入れると改善される。

「もんじゅ」の炉心設計では、MOZART 計画の測定値に基づき、測定と解析の C/E バias 補正と不確かさ評価を行い、実機と臨界実験との体系、組成などの違い補正、実機体系自身もつ不確かさなどを評価して設計を実施している。「もんじゅ」は 1994 年 4 月に初臨界を達成し、約半年の臨界・炉物理試験を行い各種反応度、反応率測定等を実施し設計の妥当性を確認した。併せて MOZART 計画に始まる研究開発の取組が適切であったことを確認することができた。

3. JUPITER 計画

動燃事業団は、MOZART 計画に続いて、1978 年から 1989 年にかけて米国エネルギー省 (DOE) との契約に基づき日米共同プロジェクトとしてアルゴンヌ国立研究所の臨界実験装置 ZPPR^{注)}を用いた JUPITER 計画 (Japanese-United States Program of Integral Tests and Experimental Researches) を実施した。ZPPR は Pu 燃料約 3 トンを有する大型の臨界実験装置である。実験計画は大型高速炉の炉心設計研究及び炉心解析法の課題を考慮して立案するため国内関係機関の協力を仰ぎ、技術者を派遣して実験立案、実施、解析に参画し、実験解析は日米双方でそれぞれの手法で独立に実施してすすめた。

本計画は大きく分けると 3 つのフェーズで実施した。

JUPITER-I (ZPPR-9,-10 炉心) では 2 領域均質炉心のベンチマーク実験であり、制御棒チャンネルのないクリーン炉心、サイクル初期 (BOC) 及び末期 (EOC) 模擬炉心において実効増倍率、制御棒反応度、出力分布、Na ボイド反応度、ドップラ反応度、物質反応度、 γ 線発熱等の核特性を測定した。

JUPITER-II (ZPPR-13 炉心) では、径非均質炉心のベンチマーク実験で、炉心中心にブランケットを配置し、その周りを 3 層の燃料領域と 2 層のブランケット領域が取り巻いたリング状の炉心構成であり、径非均質炉心設計の最も一般的な考え方に基づいたものである。得られた径非均質炉心の特性は、均質炉心のものとは比べると①Na ボイド反応度、ド

ップラ反応度の大きさが約半分である、②制御棒反応度はその値が20~30%小さく干渉効果が大きく、C/E (計算値/実験値) の径方向依存性が少し増大する、③出力分布は炉心内の摂動に対して敏感性を増す、などの傾向があることが判明した。

JUPITER-III²⁾ は出力分布の平坦化、燃焼反応度低減、中性子フルエンス低減などの可能性のある軸非均質炉心 (ZPPR-17 炉心) と ²³⁵U 約 1 トンを追加し 100 万 kWe 級 2 領域均質炉心を対象としたフルサイズ模擬実験(ZPPR-18 炉心)である。また、炉心の大型化に伴う核的デカップリング特性を把握するため追加実験 JUPITER-Io (ZPPR-19 炉心)³⁾ を行った。その結果、①軸非均質炉の実効増倍率の C/E 値は均質炉心と径非均質炉心の間位置し、各炉心に占める内部ブランケット比率と整合している、②反応率や制御棒反応度の C/E 値に径方向依存性がみられる、③反応率や物質反応度の解析値は内部ブランケット領域で大幅に過小評価するなどの結果が得られた。

このように JUPITER 計画では、実証炉から実用炉クラスの臨界実験史上最大の臨界集合体を実現させ、更に実証炉炉心の候補と考えられる均質炉心、径非均質炉心、軸非均質炉心を網羅して多くの物理量を測定し貴重なデータを得るとともに核的デカップリング挙動を含む大型炉心の炉物理特性を明らかにすることができた。また、これ等の得られた実験データをオールジャパン体制で解析評価することで我国の解析技術の開発、向上に貢献できたと考える。例えば、これ等のデータを使用して炉定数調整法に基づく高速炉核設計手法の開発を行い、課題であった反応率や制御棒反応度の C/E 値の径方向依存性について図 5 に示すように解消できることを確認している⁴⁾。

注) ZPPR : Zero Power Plutonium Reactor (1987 年 Plutonium を Physics に名称変更)

4. おわりに

2017 (平成 29) 年 3 月、歴史構築賞を頂きました。まずは、MOZART 計画及び JUPITER 計画に参画されました関係者の皆様と受賞の喜びを共有させて頂き、原子力学会の皆様のこれまでのご支援やご助言など改めてお礼を申し上げます。

今、改めて計画当初の資料を見ますと各機関から集結し、情熱をもって我が国の高速炉開発に携わった方々を思い出します。これらの成果を踏み台に「もんじゅ」の 1994 年の臨界・炉物理試験、そして運転再開後の 2010 年 5 月の Am を有意に含む炉心確認試験のデータ取得があります。残念ながら「もんじゅ」は廃炉方針が出されましたが、これまでのデータを活用し、先達の意志と技術の継承が図られることを期待します。

参考文献

- 1) 瑞慶覧、井上、鈴木、川島：「高速増殖原型炉「もんじゅ」の模擬臨界実験」672-684、18、no11 (1976)
- 2) 三田、中島、山本、白方：「日米共同大型高速炉臨界実験 (JUPITER-III) の概要」、日本原子力学会誌、31、1324-1331 (1989)

- 3) 三田、中島、白方：「高速炉炉心の核的空間結合特性実験と解析」、動燃技報, 75,20-35,(1990)
- 4) 石川、林、亀井、三田、河北：「炉定数調整による大型炉核設計手法の高度化」、動燃技法、77、92-96 (1991)

表1 MOZART 計画の測定項目

実験項目	MOZART 臨界炉心 MZ-						測定量および測定方法
	A	B(1)	B(2)	B(3)	B(4)	C	
臨界量	×	×	×	×	×	×	MZ-A=308, MZ-B=817, MZ-C≤969 kg Pu fiss.
中心反応率比	×	×					F8/F5, F5/F9, F0/F9, F1/F9, C8/F9, 核分裂計数管, 箱, SSTR, Thermal comparison, 絶対測定法
反応度値							
中心サンプル反応度値	×	×					15種類のサンプルを測定。サンプル交換用特殊燃料要素使用
半径方向反応度値分布			×				燃料要素振動実験
反応度スケール					×		
反応率分布							
MZ-A, -B(模擬制御棒なし)	×	×	×				核分裂計数管： ²³⁵ U, ²³⁸ U, ²³⁹ Pu, ²⁴⁰ Pu, ²⁴¹ Np, 箱： ²³⁵ U(n, f), ²³⁸ U(n, f), ²³⁸ U(n, γ), Al(n, α), Ni(n, β), 測定方向：軸および半径方向, 非中心軸方向
MZ-C(模擬制御棒あり)						×	箱： ²³⁵ U(n, f) および ²³⁸ U(n, f), 測定方向：半径方向および制御棒内
Na ボイド反応度							
MZ-A, -B(模擬制御棒なし)	×		×				ピンおよびプレート燃料要素内ボイド, 9燃料要素のボイド高さを5通り, 半径方向6点
MZ-C(模擬制御棒あり)						×	制御棒挿入, 引抜き時のボイド反応度
制御棒反応度値						×	臨界法, 制御棒:「もんじゅ」用制御棒を模擬(19本 B ₄ Cピン使用), ¹⁰ B濃縮度は20(天然), 30, 80, 90%および80/90一束化制御棒(MK.I), 42制御棒挿入パターンで測定
中性子スペクトル							
陽子反跳法	×						水素封入球型比例計数管
T.O.F.	×						飛行距離: 50, 200m, 2および4in. Li-ガラス検出器使用
⁶ Li	×						
ダブル・シンチレーション法	×						
燃料落下・再配列模擬実験							修正拡散法の適用性評価
燃料落下模擬実験			×				炉心中心3行×3列燃料要素において燃料プレートを中央部に集積
燃料再配列模擬実験			×				炉心・ブランケット境界の試験領域において燃料プレートを周辺に移動
遮蔽実験			×				γ線量率分布, イオン・チェンバー, SSCD, ブランケット内中性子スペクトル

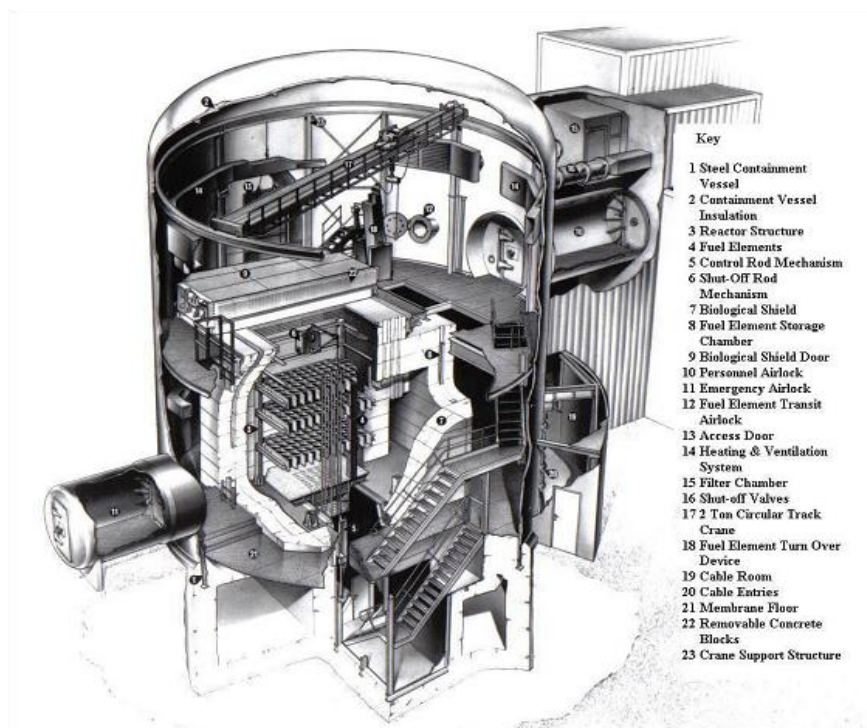


図1 高速臨界実験装置 ZBRA

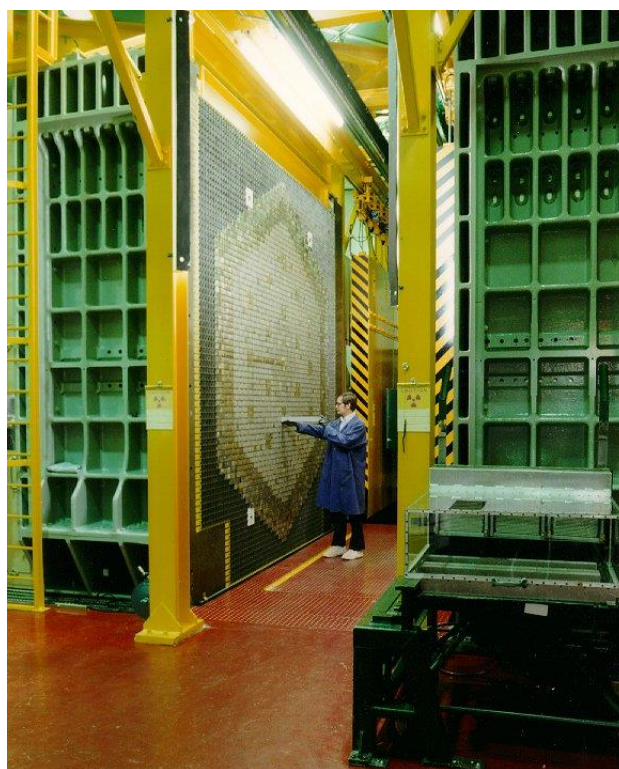
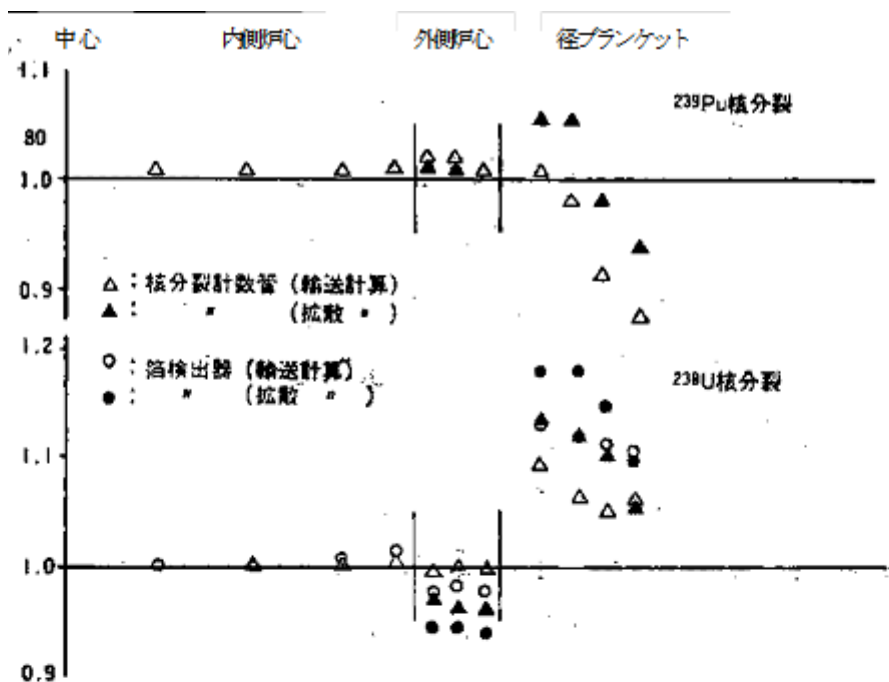
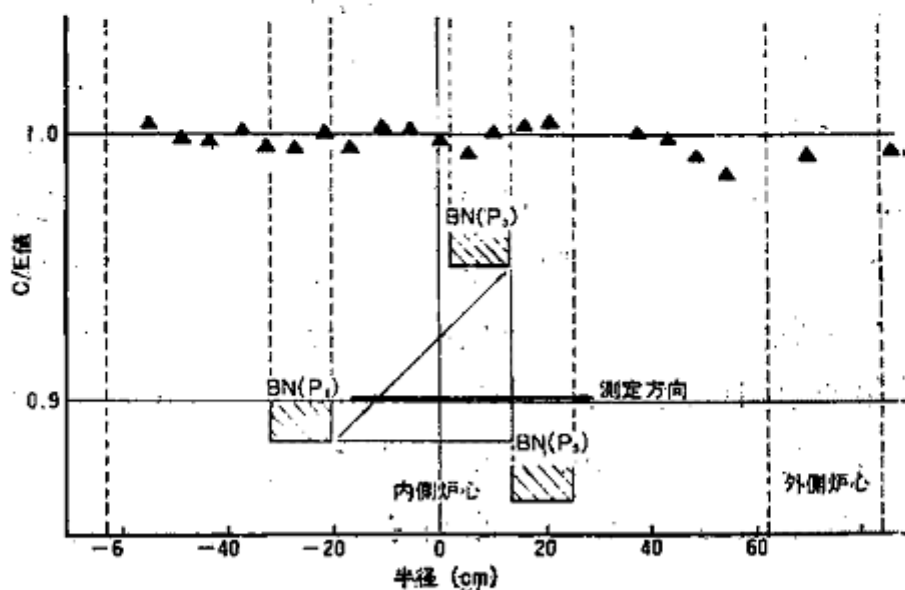


図2 高速臨界実験装置 ZPPR



(a) MZ-B(2)における ^{239}Pu と ^{238}U 核分裂率分布の計算値と実験値の比較



(b) 制御棒3本挿入体系(MZ-C)における ^{239}Pu 核分裂率分布の計算値と実験値の比較

図3 反応率分布の計算値と実験値の比較

	炉心構成	模擬対象	実施期間
JUPITER-I		60万~80万 kWe級 2領域均質炉心	1978年8月~ 1981年8月 (3年)
JUPITER-II		65万kWe級 径方向 非均質炉心	1982年5月~ 1985年5月 (3年)
JUPITER-III		65万kWe級 軸方向 非均質炉心	1986年11月~ 1988年11月 (2年)
		100万kWe級 2領域均質炉心	

□ 炉心 IC:内側炉心 OC:外側炉心
 ▨ ブランケット IB:内部ブランケット AB:軸方向ブランケット
 RB:径方向ブランケット

図4 JUPITER計画の概要

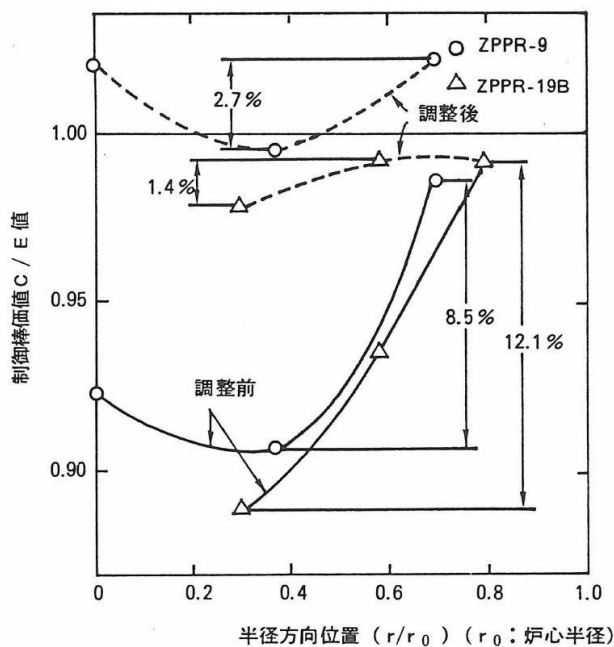


図5 炉定数調整による制御棒価値 C/E 値の径方向依存性の変化