

日米共同臨界実験とその解析

全 体 ま と め

1993年5月

動力炉・核燃料開発事業団

東 海 事 業 所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

技術開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4-33, Muramatsu, Tokai-Mura, Nakagun, Ibaraki-Ken 319-11, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1992

日米共同臨界実験とその解析 全体まとめ

松本 忠邦*

要 旨

「日米共同臨界実験」は、高速炉燃料のリサイクル技術開発の一環として動燃事業団と米国エネルギー省が共同で計画し、1983年8月より約5年の歳月をかけて実施したものである。その詳細なデータは、主目的である文字通りの「臨界実験」については4件の論文^{1) 2) 3) 4)}として、またそれに関連して実施した「未臨界度測定装置の開発と試験」については3件の論文^{5) 6) 7)}として米国原子力学会発行の Nuclear Technology 誌等に公開（一部未掲載）されている。

本報告書は、主目的である「臨界実験」に係わる上記4件の論文を基に、実験結果と解析結果について要点だけを一括して取りまとめるとともに、それらの論文とは別の視点からの説明を加えたものである。即ち、高速炉燃料サイクル施設の臨界安全という視点から「実験のねらい」、既存の臨界実験との実験条件の違いという視点から「日米共同臨界実験の特徴」、また臨界安全解析手法の信頼性評価という視点から「SCALEコードシステムの誤差評価」「溶液密度式の評価」等に重点を置いて、分かりやすい図表を作って説明を加えている。

なお、臨界実験では、核燃料施設用臨界安全解析手法の誤差評価に使用できる「精度の良い臨界実験データの取得」を第一とし、特に高速炉燃料サイクルに関連した燃料条件で、3つに大別される合計77ケースのデータを取得している。また、それらの臨界実験データによりSCALEコードシステムの検証を行い、その高い信頼性を確認している。

* 再処理技術開発部

目 次

1. はじめに	1
2. 計画の概要	2
2.1 臨界実験の基本パラメータ	2
2.2 既存実験との比較	4
2.3 臨界実験施設	6
2.4 臨界実験の解析手法	6
3. 臨界実験の内容	10
3.1 均質溶液燃料からなる体系	10
3.2 棒状燃料と溶液燃料からなる体系	21
3.3 棒状燃料と有機溶媒からなる体系	26
3.4 溶液燃料の同位体組成	31
4. 臨界実験の解析	33
4.1 均質溶液燃料の体系の解析	33
4.2 棒状燃料と溶液燃料の体系の解析	40
4.3 棒状燃料と有機溶媒の体系の解析	43
4.4 溶液燃料の密度式の検討	46
5. まとめ	49
参考文献	50
付録-1 実験施設及び実験装置の写真集	53

図表リスト

第2章

- 表2.1.1 日米共同臨界実験の基本パラメータ
- 表2.2.1 臨界実験の種類とケース数の比較
- 図2.3.1 臨界実験施設の位置
- 図2.3.2 臨界実験施設の概要
- 図2.3.3 臨界集合体室の概要

第3章

- 表3.1.1 臨界実験のパラメータとケース数 (均質溶液燃料系)
- 表3.1.2 均質溶液燃料系の臨界実験結果 (平板槽)
- 表3.1.3 均質溶液燃料系の臨界実験結果 (小口径の円筒槽)
- 表3.1.4 均質溶液燃料系の臨界実験結果 (大口径の円筒槽)
- 表3.1.5 均質溶液燃料系の臨界実験結果 (円環槽)
- 図3.1.1 均質溶液燃料系の燃料濃度調整 (Pu濃度とU濃度の組合せ)
- 図3.1.2 均質溶液燃料系燃料の燃料濃度とH/Fissileの関係
- 図3.1.3 均質溶液燃料系の臨界実験装置 (平板槽)
(水反射体タンク付の状態)
- 図3.1.4 均質溶液燃料系の臨界実験装置 (円筒槽)
(イ) 水反射体タンク付 (ロ) コンクリート反射体付
- 図3.1.5 均質溶液燃料系の臨界実験装置 (円環槽)
(水反射体タンクを外した状態)

- 表3.2.1 臨界実験のパラメータとケース数 (棒状+溶液/非均質燃料系)
- 表3.2.2 臨界実験結果 (棒状+溶液/非均質燃料系)
- 図3.2.1 臨界実験装置 (ボイラチューブ型の槽)
(水反射体タンクを外した状態)
- 図3.2.2 ボイラチューブ型槽の臨界燃料液位 (燃料濃度をパラメータ)
- 図3.2.3 ボイラチューブ型槽の臨界燃料液位 (G d濃度をパラメータ)

- 表3.3.1 臨界実験のパラメータとケース数（有機溶媒減速棒状燃料系）
- 表3.3.2 臨界実験の結果（有機溶媒減速棒状燃料系）
- 図3.3.1 臨界実験の装置（棒状燃料用円筒槽）
- 図3.3.2 臨界ピン本数と臨界体積（格子ピッチをパラメータ）
- 図3.3.3 臨界ピン本数の減速材による比較

- 図3.4.1 241Amの含有率変化と解析用の241Am含有率

****第4章****

- 表4.1.1 均質溶液燃料系の解析結果（平板槽）
- 表4.1.2 均質溶液燃料系の解析結果（小口径の円筒槽）
- 表4.1.3 均質溶液燃料系の解析結果（大口径の円筒槽）
- 表4.1.4 均質溶液燃料系の解析結果（円環槽）
- 表4.1.5 解析手法の評価（均質溶液燃料系）
- 図4.1.1 均質溶液燃料系の解析結果（Pu富化度依存性）
- 図4.1.2 均質溶液燃料系の解析結果（H/Fissile原子個数比依存性）
- 図4.1.3 均質溶液燃料系の解析結果の比較（SCALE-2/PNC : SCALE-4/ORNL） ****
- 表4.2.1 棒状+溶液／非均質燃料系の解析結果
- 表4.2.2 解析手法の評価（棒状+溶液／非均質燃料系）
- 図4.2.1 棒状+溶液／非均質燃料系の解析結果（燃料濃度依存性）
- 図4.2.2 棒状+溶液／非均質燃料系の解析結果（G d濃度依存性）

- 表4.3.1 有機溶媒減速棒状燃料系の解析結果
- 図4.3.1 有機溶媒減速棒状燃料系の解析結果(SCALE-2)
- 図4.3.2 有機溶媒減速棒状燃料系の解析結果(SCALE-4)

- 図4.4.1 溶液密度の計算値と実測値
- 図4.4.2 溶液密度式による計算値と実測値の差（HB式）
- 図4.4.3 溶液密度式による計算値と実測値の差（SST式）

付録

- 写真-A 臨界実験施設の外観
- 写真-B 臨界実験施設の内部（制御室）
- 写真-C1 均質溶液燃料系の臨界実験装置（平板槽）
（水反射体用パネルを外した状態）
- 写真-C2 均質溶液燃料系の臨界実験装置（円筒槽）
（大／小口径の2基を水反射体タンク内に設置した状態）
- 写真-C3 均質溶液燃料系の臨界実験装置
（円筒槽用のコンクリート反射体）
- 写真-C4 均質溶液燃料系の臨界実験装置
（円環槽、燃料ボトル、及びスペーサ）
- 写真-C5 均質溶液燃料系の臨界実験装置
（円環槽と燃料ボトルの間に挿入する中性子吸収材）
- 写真-D 棒状＋溶液／非均質燃料系の臨界実験装置
（ボイラチューブ型の槽）
- 写真-E 有機溶媒減速棒状燃料系の臨界実験装置
（大型水タンク及び燃料棒を装荷した円筒タンク）

1. はじめに

「日米共同臨界実験」は、高速炉燃料のリサイクル技術開発の一環として動燃事業団と米国エネルギー省が共同で計画したものであり、1983年8月より約5年の歳月をかけて実施されている。その詳細なデータは、主目的である文字通りの「臨界実験」については4件の論文^{1) 2) 3) 4)}として、米国原子力学会発行の Nuclear Technology 誌に、またそれに関連して実施した「未臨界度測定装置の開発と試験」については3件の論文^{5) 6) 7)}として、同じく米国原子力学会発行の Nuclear Science and Engineering誌、又は Nuclear Technology 誌に投稿されている。

本報告書は、主目的である「臨界実験」について、4件の論文に示された実験結果と解析結果の要点だけを一括して取りまとめるとともに、それらの論文だけでは分かりにくい「高速炉燃料サイクル施設の臨界安全という観点から見た実験のねらい」「既存の臨界実験との実験条件の違いという視点から見た日米共同臨界実験の特徴」「SCALEコードシステムの信頼性評価結果」等に重点を置いて、分かりやすい図表を作って説明を加えたものである。

本報告書では、「臨界実験」を、燃料の形態（燃料溶液、又は燃料棒）と減速材の種類（燃料溶液、又は有機溶媒）によって、(1)均質溶液燃料からなる体系^{1) 2)}、(2)棒状燃料と溶液燃料からなる体系³⁾、(3)棒状燃料と有機溶媒からなる体系⁴⁾の3つに分類して取りまとめている。また、「臨界実験」は、核燃料施設の臨界安全解析に使用する計算手法（計算コードと断面積ライブラリ）の誤差を評価するための精度の良い臨界実験データを取得することが目的であることから、実験に使用した溶液燃料の組成の変化にも細心の注意を払うとともに、溶液密度の測定も行っているため、それらのデータを使った検討も行っている。

なお、本報告書に含めてはいないが、「未臨界度測定装置の開発と試験」は、²⁵²Cf を線源としたノイズ法で体系の未臨界度（未臨界状態における体系の実効増倍率）を測定する方法について、実際の核燃料処理装置と同様な形状の体系（炉心タンク）を使った原理実証を行うとともにその応用の可能性を探ることを目的として実施したものである。

2. 計画の概要

高速炉燃料サイクルの経済性を考える上で大きな足かせとなっているものとして、臨界安全の確保がある。高速炉燃料の場合には、その燃料サイクルの全てのステップで、軽水炉燃料に比べるとプルトニウム含有率の高い燃料を取り扱うので、特にその足かせは厳しいものとなっている。

高速炉燃料サイクルに関連した施設の各種設備を、臨界安全性を確保しつつ、しかしながら、過剰な裕度を取り除いた合理的な設計とするためには、臨界安全解析手法の信頼性を定量的に把握しておくことが不可欠である。また、そのためには、精度のよい臨界実験データが必要である。

核燃料施設における燃料の形態を考慮した臨界実験データとしては、主として米国で取得されたものが数多く公開されている。また、公開された既存の臨界実験データを使った臨界安全解析手法の信頼性確認作業は、SCALEコードシステムの検証作業として別途実施済みである⁸⁾。

しかし、高速炉燃料サイクル関連施設を臨界安全の評価対象とすることを考えた場合には、その燃料条件をカバーする「Pu富化度」或は「燃料濃度」等における臨界実験は充実しておらず、十分な検証作業ができない状態であったので「日米共同臨界実験」が計画された。

2.1 臨界実験の基本パラメータ

日米共同臨界実験の基本パラメータを、表2.1.1に示す。臨界実験は、燃料形態等により3種類に大別されるが、それぞれの燃料における実験パラメータ設定のねらいは以下の通りである。

(1) 「均質溶液燃料」の体系では、計算手法の検証用の臨界実験データとして既存データが比較的多いものの、実際の核燃料リサイクル施設の臨界安全評価を考えた場合には、主として以下に示すような領域で実験データに不足があった。

- Pu富化度： 高速炉燃料の再処理及び混合転換を対象とした領域
- 燃料濃度： 極端に高い領域及び低い領域
- 炉心形状： 平板及び円環
- 吸収材： 固体状の中性子吸収材を含む体系
- 反射材： コンクリートあるいは裸の体系

表 2.1.1 日米共同臨界実験の基本パラメータ

燃料形態	形状	Pu富化度 (w/o)	燃料濃度 (gHM/l)	吸収材	反射材
均質 溶液燃料	円筒	20, 40, 50	20, 50, 100, 200, 300, 450	—	水、 コンクリート、 空気(裸)
	平板	20, 40, 50	100, 200, 300, 450	—	水、 空気(裸)
	円環 *a)	20, 50, 100	50, 100, 200, 300, 450	普通コンクリート、 コンクリート+B ₄ C* ^{b)} ポリエチレン+Cd、 空気	水
棒状燃料 +溶液燃料	円筒	20 * ^{c)} 燃料ピン		—	水
		20 燃料溶液	0, 100, 200, 300, 450	Gd: (g/l) 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.2	
有機溶媒 減速 棒状燃料	直方体	20 * ^{d)} 燃料ピン	減速材: 反射材に 同じ	—	TBP+NPH* ^{e)} 水

*a) 内側に、吸収材(円環、円筒)及び燃料溶液ボトル(円筒)が挿入可能。

*b) B₄C:1, 2, 6 w/o

*c) 正方格子(ピッチ: 1.40 cm)

*d) 正方格子(ピッチ: 0.76, 0.97, 1.24, 1.54, 1.94 cm)

*e) NPH: Normal Paraffin Hydrocarbon

そこで、均質溶液燃料体系の実験パラメータの設定では、上記の不足を補うことに重点をおきつつ、均質な溶液状の燃料が広く化学プロセス全体に共通の燃料形態であることから、系統的にデータの蓄積ができるよう考慮した。その結果として、この燃料体系だけで全実験ケースのほぼ4分の3の57ケースを占めることとなっている。

特に、固体状の中性子吸収材については、中性子相互干渉の防止用として使用されることを考慮して、それ自体を円筒状あるいは円環状に加工し、それぞれ円環槽の内側、或は円環槽と更に内側に挿入した円筒形の燃料ボトルとの間に配置して使用することとした。円環槽の内側の領域は、そこに中性子の減速材と吸収材が存在しない限り、円環槽の対面間、或は円環槽と内側ボトルの間で中性子の強い相互干渉が存在しうる領域である。

(2)「棒状燃料と溶液燃料」からなる体系の実験は、溶解槽特有の解析上の課題に明快な回答を与えるために計画したものである。

そこでは、燃料ピンの格子ピッチを水による最適減速領域より小さくし、減速材領域には水ではなく燃料溶液を使用した。その燃料溶液中の燃料濃度は通常溶解槽のプロセス条件よりかなり高い領域まで、また Gd 濃度は実験が成立する限り高いところまで変化させた。

(3)「棒状燃料と有機溶媒」からなる体系の実験は、有機溶媒が水に比べて反応度を有意に高めるものではないこと、及び有機溶媒を構成している元素 (H, C, O, P) の核データとして既存の断面積ライブラリに用意されているものを使っても問題がないことを確認するために計画したものである。

「有機溶媒減速棒状燃料」という体系は、現実のプロセスとしては存在しないが、Pu を抽出した状態での臨界実験が困難なことから、有機溶媒と燃料ピンの非均質体系として実施した。この場合には、有機溶媒減速条件下での臨界ピン本数と水減速下でのそれとを直接比較することにより有機溶媒を水でモデル化することの妥当性を評価できる。

2.2 既存実験との比較

ここで日米共同臨界実験の実施によって、臨界実験データの種類或はケース数が既存実験と比べて概略どのように増加したかを見してみる。なお、実験パラメータのもう少し詳しい比較は、次章の各節で示すこととする。

既存実験の種類とケース数を、日米共同臨界実験の種類とケース数と比較する形で表2.2.1 に示す。なお、既存実験のケース数は、動燃事業団が独自に実施した臨界安全解析手法 (SCALEの第2版) の検証作業⁸⁾ に使ったものを示しているが、それには主として米国で実施されて公開されている既存の臨界実験の中で、Pu 或は Pu+U 燃料を含む臨界実験としては、ほとんどすべてのケースを網羅している。

表 2.2.1 臨界実験の種類とケース数の比較

燃料形態		既存実験	日米共同実験
均質系	溶液 (Pu 単体)	70	3 ^{*a)}
	(Pu+U混合)	53	54
非均質系	酸化物 (Pu 単体)	20	-
	(Pu+U混合)	136	-
非均質系	燃料棒 (水減速)	50	2
	(有機溶媒減速)	-	5
燃料棒+燃料溶液		23	13
[ケース数合計]		[352]	[77]

*a) Uを含むが少量である。(Pu/Pu+U: 97%程度)

日米共同臨界実験では、酸化物の形態をした燃料の実験をしていないが、有機溶媒を減速材とした燃料棒の実験をしているのが特徴的である。また、Pu+U 均質溶液系ではデータの数が2倍に、燃料ピンとPu+U燃料溶液からなる系でも1.5倍と大幅な増加となっていることが分かる。なお、有機溶媒を含む体系における臨界実験データが得られたのは世界で初めてのことである。

2.3 臨界実験施設

臨界実験は、米国エネルギー省のパシフィック・ノースウエスト研究所（PNL）の臨界実験施設（CML）で実施した。施設の位置と概要を図 2.3.1～2.3.3 に示す。（付録-1：写真-A, -B 参照）

本施設は、Pu燃料の平和利用のための臨界データを取得するために建設された施設であり、ここではこれまでもPu燃料を取り扱う核燃料施設のために多くの貴重な臨界実験データを取得してきている。既に公開されているPu燃料に係わる臨界実験データは、世界的に見ても本施設で得られたものが大部分である。実際に、上述の SCALE-2の検証に使った既存実験の352ケースのうち本施設以外で得られたデータは、英国の実験データの10ケースのみである。なお、仏国でも核燃料施設用としての臨界実験を多数実施しているようであるが、非公開であるためその詳細は不明である。

2.4 臨界実験の解析手法

臨界実験の解析には、核燃料施設や輸送容器の臨界安全解析に使用するために米国オークリッジ国立研究所（ORNL）で開発されてきた「SCALEコードシステム」^{9) 10) 11)}を使用した。本システムの開発の歴史は古く、世界中で最も広く使用されている。日米共同臨界実験では、米国側として計画管理と実験解析を担当していたのがORNLであったので、「SCALEコードシステム」は両方で共通に使用するには好都合であった。なお、動燃事業団では、国内で「JACSコードシステム」が開発される以前から「SCALEコードシステム」の検証を実施し、設計等に使用してきている。

ORNLでは、同システムの開発元であることから、解析の実施時期により違うが常にSCALEコードシステムの最新版(SCALE-3.1¹⁰⁾, SCALE-4¹¹⁾)を使用することになり、また、動燃事業団は当時公開されていた中では最新版でかつ既存実験による検証を終えていた「SCALE-2」⁹⁾を一貫して使用した。なお、後述の解析結果の比較で出てくるSCALE-2は、動燃事業団の解析結果を示し、SCALE-3.1及びSCALE-4は、ORNLの解析結果を示している。

実験の解析は、実験のモデル化も含めて、日米でそれぞれ独立に実施した。

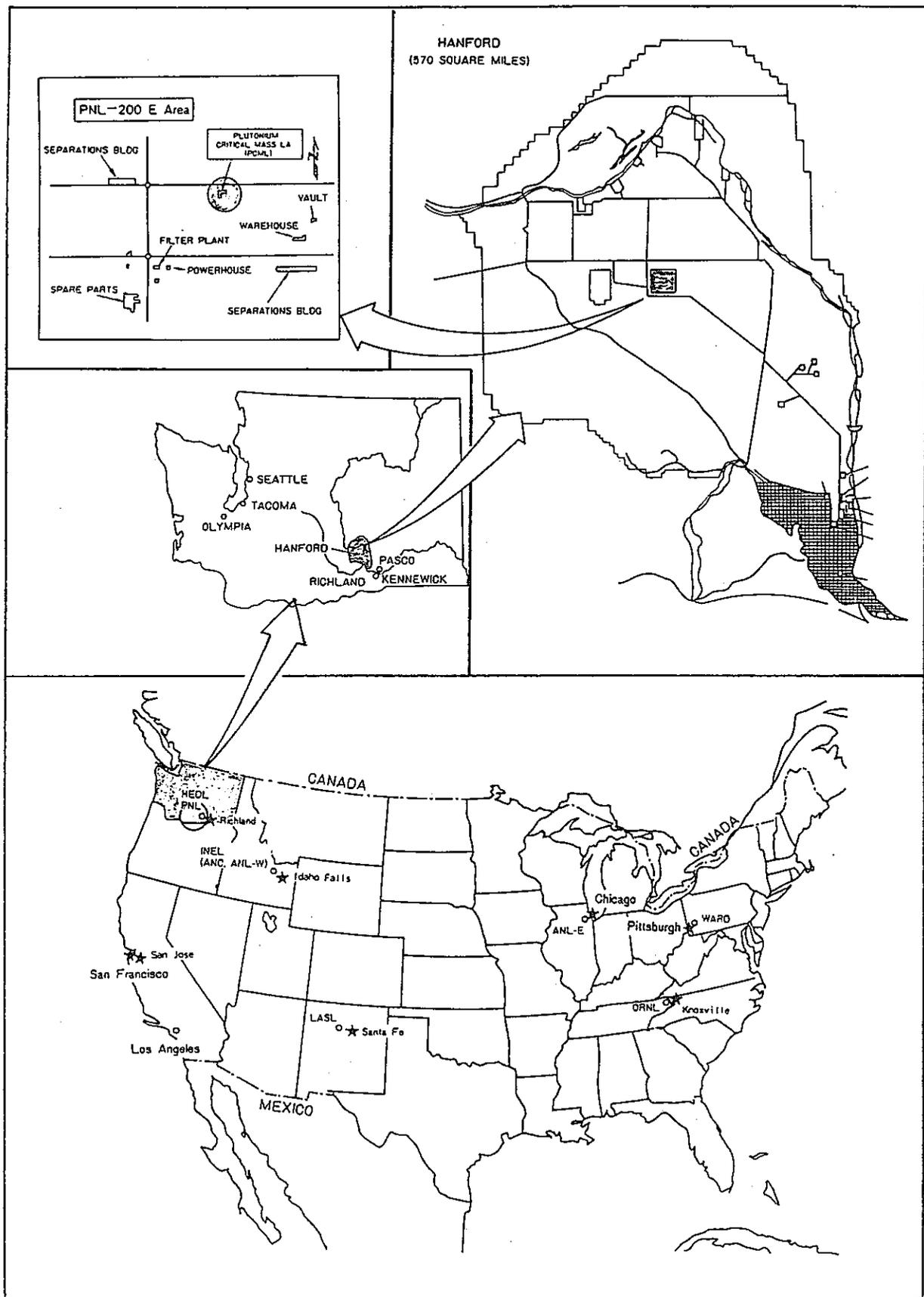


図2.3.1 臨界実験施設の位置

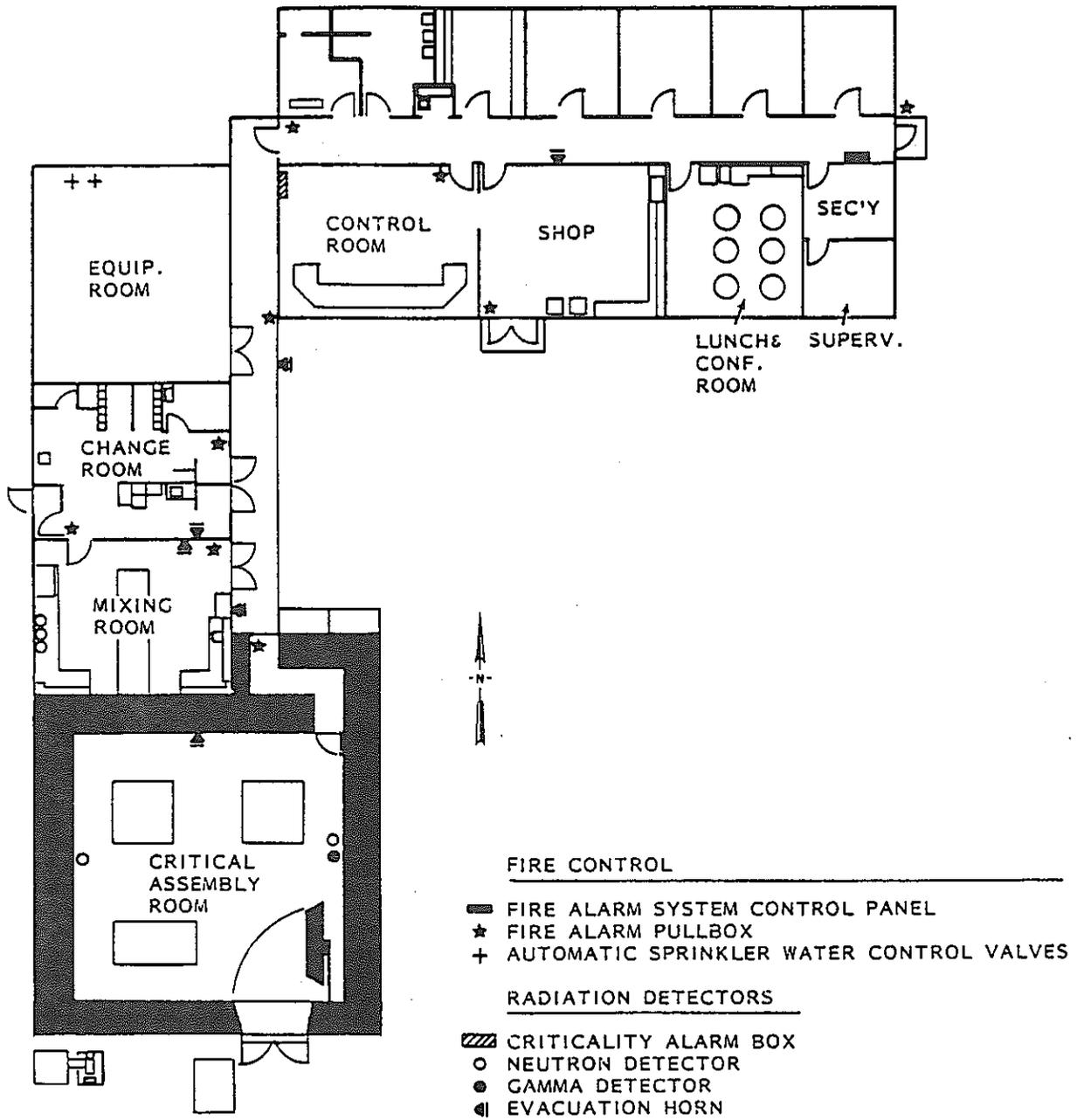
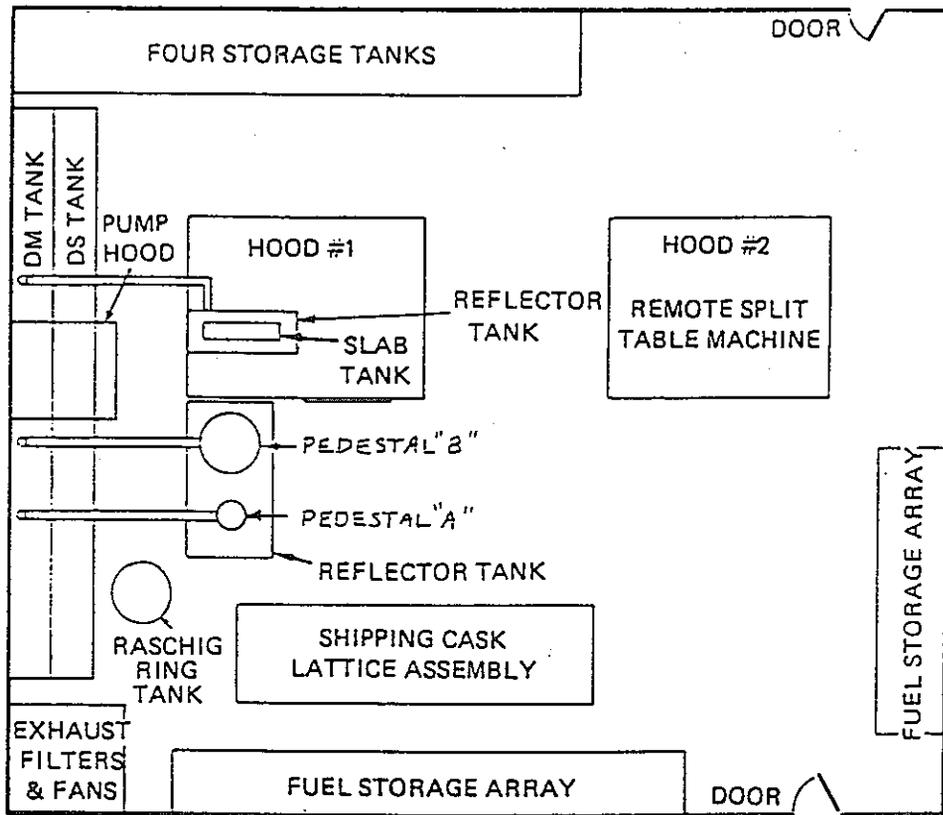


図2.3.2 臨界実験施設の概要



Note: Not drawn to scale

図2.3.3 臨界集合体室の概要

3. 臨界実験の内容

3.1 均質溶液燃料からなる体系^{1) 2)}

3.1.1 実験のねらい

(1) 燃料の濃度と Pu 富化度

使用済燃料の再処理からMOX 転換までのプロセスを通して、最も多い燃料の形態は均質な溶液である。その均質な溶液中の燃料の「濃度」や燃料中の「Pu富化度」は、溶解液、製品溶液、廃液などと、それぞれのプロセス毎に大きく変動する。また、それぞれのプロセス内でも濃縮、抽出、希釈等の操作により大きく変動することがある。

燃料の「濃度」は、均質の燃料溶液において比較的容易に変動し、かつ変動幅も大きくなりうる臨界パラメータ（体系の臨界性に直接影響を及ぼす因子）である。そこで、臨界安全解析では、通常状態の濃度範囲だけではなく、広くプロセス異常を想定したときに考えられる濃度範囲までを評価対象とする必要がでてくる。

臨界安全解析に使用する計算コードは、そのような広い濃度範囲を網羅した臨界実験によって検証されていること、またその検証結果が燃料濃度に依存しないことが強く望まれる。

日米共同臨界実験では、プロセス異常を考慮しないと達することのないような高濃度の領域と、既存の炉心タンクで臨界にできる最低の濃度領域、という実験データの少ない高低両極端の濃度領域まで系統的に臨界データを取得することに重点を置くこととした。

なお、それ以前に実施された臨界実験の濃度範囲が狭かったのは、低濃度にしてしまうと再濃縮の負担が増えること、また高濃度で臨界にするには燃料の量が足りないことなどの理由によっている。

「Pu 富化度」については、高速増殖炉では、炉心燃料集合体に軸方向のブランケット燃料部を有するため、溶解液中の Pu 富化度が炉心燃料部だけで見た場合に比べて低下することや、Puが Uと混合されてから MOXに転換されることを考慮して、実験範囲を設定している。

(2) 中性子吸収材

再処理プロセスの途中には、要所要所に燃料溶液の中間貯槽が設置され、その容量の大小は、再処理プラントの安定運転に大きな影響を与える。再処理プラントの規模が大きくなるほど必要とする貯槽の容量が増えるが、燃料溶液の液厚の制限から貯槽の見かけ上の

サイズが大きくなるため、貯槽を複数に分割する等の対策が必要となってくる。また同一のセル内に別の貯槽を設置する必要もありうる。

複数の貯槽を同一セル内に設置する場合、貯槽間の距離だけで貯槽間の中性子の相互干渉を防止しようと考え、セル内のスペース効率が極めて悪くなり、セルのサイズに、更には建家のサイズに悪い影響を与える。

貯槽のスペース効率を上げるには、「中性子吸収材」の使用が効果的である。

日米共同臨界実験では、中性子吸収材を含む体系を構成するのに「円環槽」を使用することとした。その場合、内側に円筒状あるいは円環状の中性子吸収材の挿入が可能である。中性子吸収材を円環状にした場合には、更にその内側に燃料溶液をいれた円筒状のボトルを挿入することが可能である。中央に燃料ボトルを置いた場合、中性子吸収材を通した中性子の相互干渉を、ボトルが存在しない円筒状の吸収材の場合に比べて強いものに行うことができる。

3.1.2 実験条件

均質溶液燃料体系にかかわる日米共同臨界実験の実験パラメータと実験ケース数を、既存実験と比較する形で表3.1.1に示す。また、実際に濃度調整を行って臨界実験に使った燃料溶液の燃料濃度（Pu濃度とU濃度の組合せ）を図3.1.2に示す。なお、これらの燃料溶液の水素対フィッサイル原子個数比（H/Fissile）を燃料濃度（Pu+U或はPu濃度）に対してプロットしたものを図3.1.3に示している。ここで、H/Fissileは、Pu+U濃度に対して描くとPu富化度により4本に分かれるが、U燃料の ^{235}U 含有率が天然ウラン程度と低いので、Pu濃度に対して描くとほぼ1本にまとまっている。

これらの図表より、Pu+U混合燃料の均質溶液系では、これまで平板や円環という基本的な形状についても臨界実験がなされていなかったこと、また、日米共同臨界実験では、燃料濃度の高い（H/Fissileが小さい）領域に重点を置き、燃料濃度の低い（H/Fissileが大きい）領域にも配慮していることがわかる。

3.1.3 実験装置

日米共同臨界実験に使用した溶液燃料用の炉心タンクを、平板槽、円筒槽（水反射及びコンクリート反射）、円環槽の順に、図3.1.3、図3.1.4、図3.1.5に示す。なお、円環槽及びその内側に挿入する中性子吸収材と燃料ボトルについては、今回の実験のために新しく製作したものであり、それ以外のものは既存のものを活用した。（付録-1：写真-C1～-C5参照）

なお、ちょうど臨界になる体系の大きさは、各形状の炉心タンクで、燃料の組成及び濃度ごとに、タンク内の燃料溶液の液位を繰り返し微増させることにより決定する。

3.1.4 実験結果

日米共同臨界実験の均質溶液燃料に係わる実験結果の基本データを、平板槽、円筒槽（小口径）、円筒槽（大口径）、円環槽の順に、それぞれ表3.1.2、表3.1.3、表3.1.4、表3.1.5に示す。

表 3.1.1 臨界実験のパラメータとケース数 (均質溶液燃料系)

()内: ケース数

データソース	炉心形状	Pu富化度 (w/o)	Pu+U濃度 (gHM/l)	吸収材 ^{*a)}	反射材
日米共同 臨界実験 (57ケース)	円筒(22)	20(21)	20	普通コンクリート(1)	水 (36)
	平板(17)	40(16)	~	コンクリート+B ₄ C(14)	コンクリート(6)
	円環(18)	50(17)	490	ポリエチレン+Cd(2)	裸 (15)
		97(3)		空気 (1)	
既存実験 (53ケース)	円筒(50)	15(1)	40	Gd (10)	水 (53)
	球 (3)	30(50)	~	B+Gd (9)	
		38(2)	330	ランタニウム (8)	
				なし (26)	

*a) 日米共同臨界実験の吸収材は、燃料溶液とは非接触の固体で、円環炉心の内側空間に挿入する形で実験に使用する。

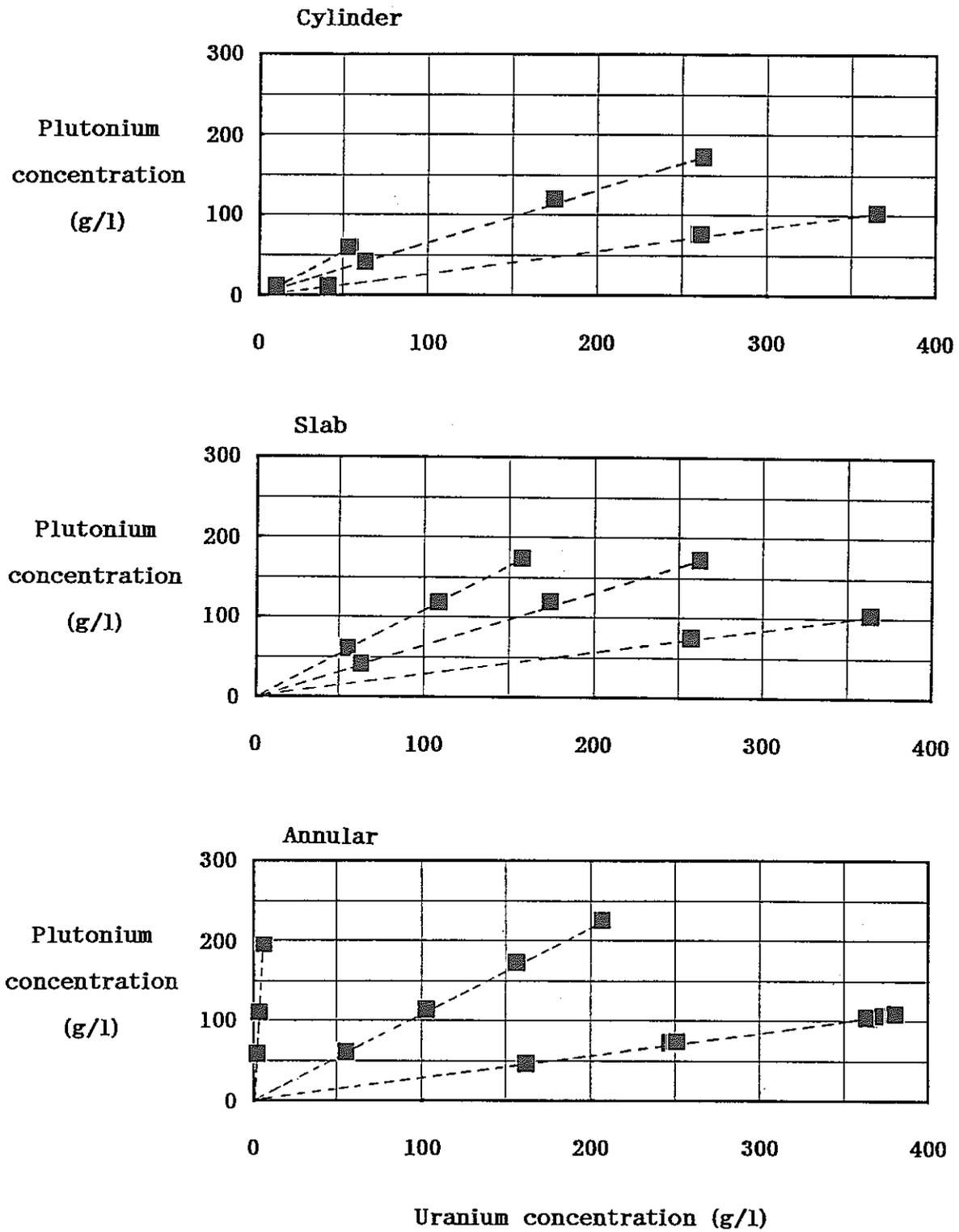


図3.1.1 均質溶液燃料系の燃料濃度調整 (Pu濃度とU濃度の組合せ)

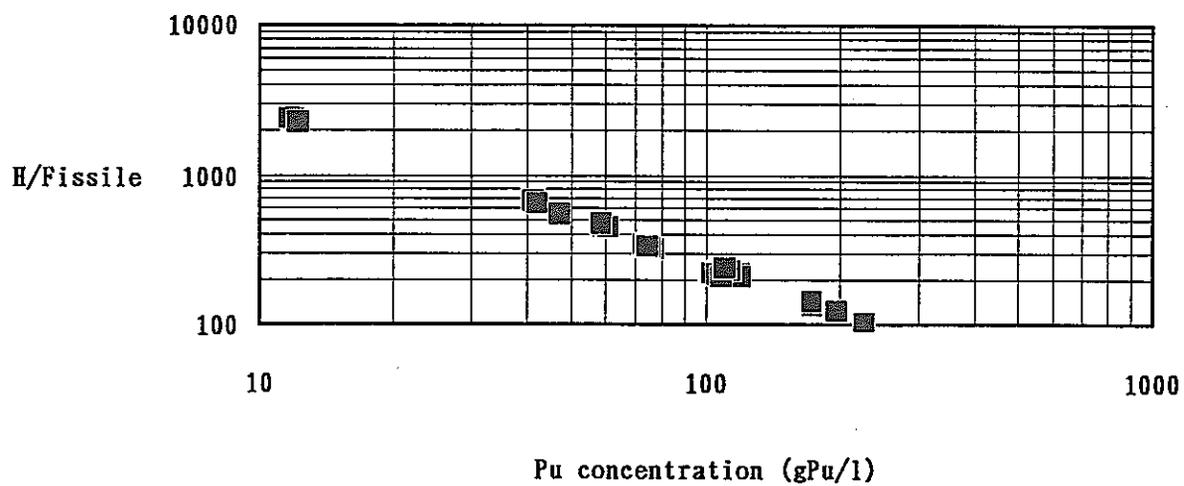
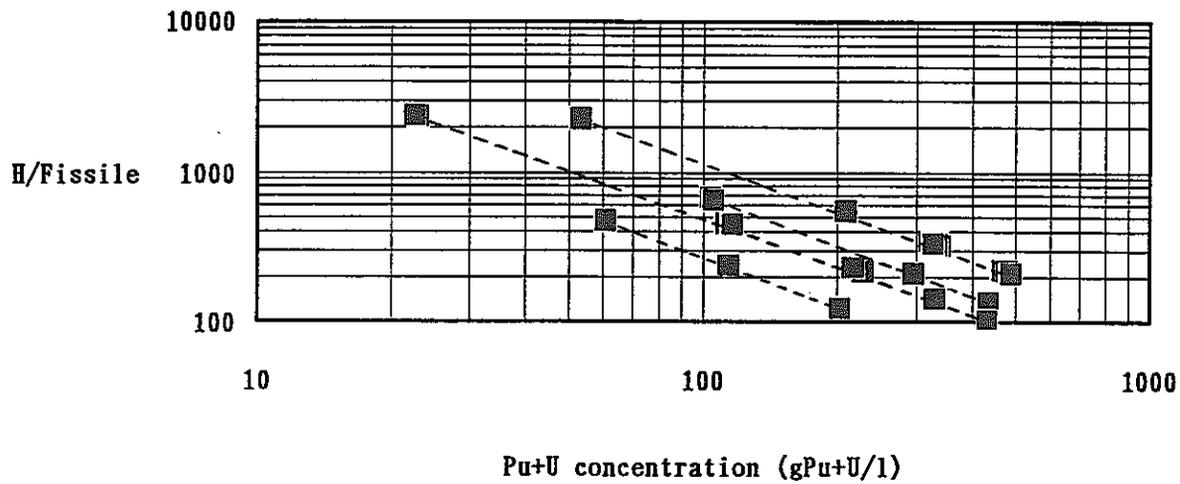


図3.1.2 均質溶液燃料系燃料の燃料濃度とH/Fissileの関係

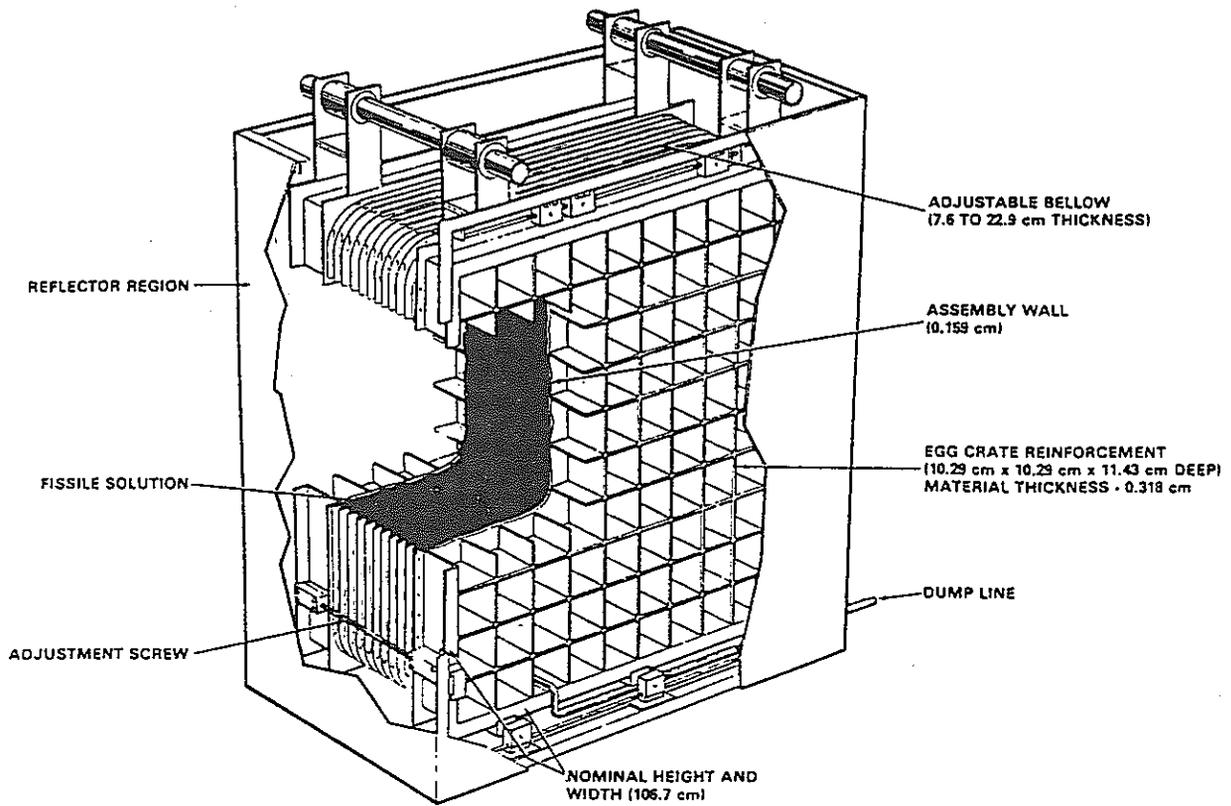
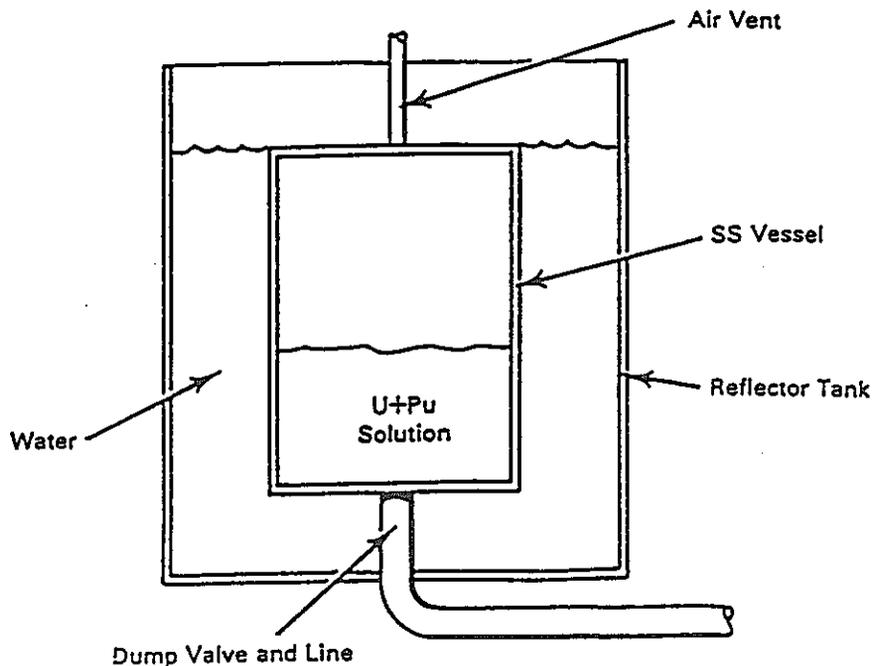
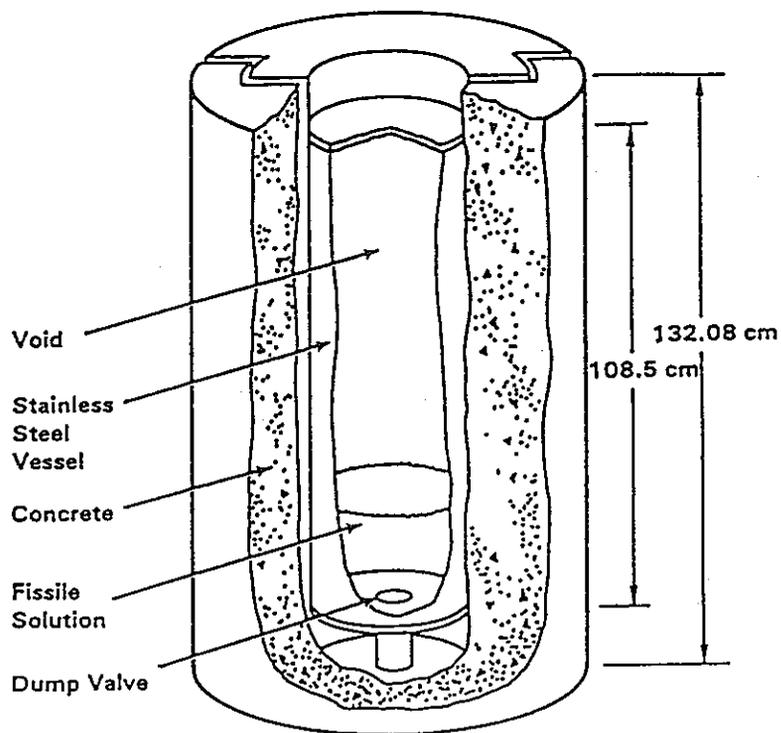


図3.1.3 均質溶液燃料系の臨界実験装置 (平板槽)
(水反射体タンク付の状態)



(I) 水反射体タンク付



(II) コンクリート反射体付

図3.1.4 均質溶液燃料系の臨界実験装置（円筒槽）

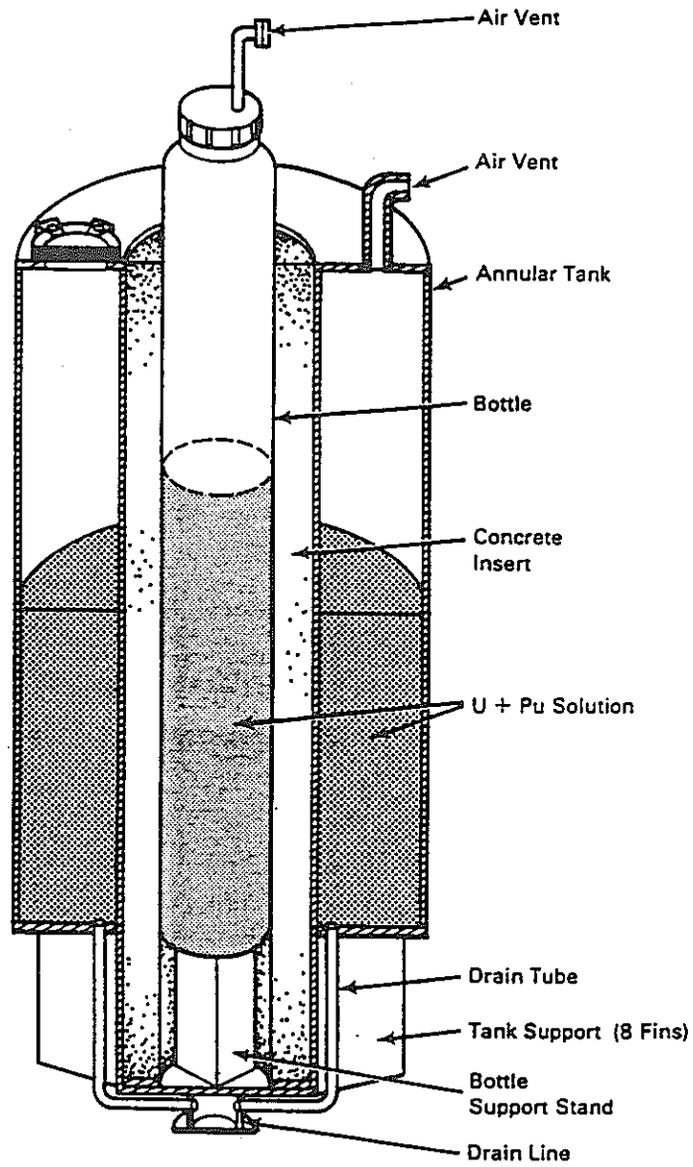


図3.1.5 均質溶液燃料系の臨界実験装置（円環槽）
（水反射体タンクを外した状態）

表3.1.2 均質溶液燃料系の臨界実験結果（平板槽）

Run Date	CML Experiment	Reflector	Sample	Pu (g/L)	U (g/L)	Density (g/cm ³) ^a	Free Acid (M)	Slab Thickness (cm)	Critical Height (cm)
04/08/85	049A	Bare ^b	1095A	173.0	157.48	1.5316	1.15	18.10	78.74
04/10/85	050	Bare ^c	1095B	173.6	157.52	1.5329	1.15	18.10	71.88
09/05/85	054	Water	1119	118.2	108.39	1.3714	0.82	12.19	60.62
09/06/85	055	Water	1120	60.2	55.17	1.1944	0.55	12.19	83.41
09/09/85	056	Bare ^c	1121	60.6	55.52	1.1954	0.53	19.05	45.31
09/10/85	056a	Bare ^c	1121	60.6	55.52	1.1954	0.53	17.78	60.15
02/04/86	063	Bare ^c	1153	41.06	62.89	1.1725	0.61	19.81	54.70
02/10/86	064	Water	1154	41.90	63.36	1.1752	0.61	13.97	80.14
03/13/86	071	Water	1166	118.87	173.48	1.4633	1.03	13.97	47.44
03/14/86	072	Water	1166	118.87	173.48	1.4633	1.03	12.70	67.16
03/18/86	074	Bare ^c	1167	119.04	174.01	1.4637	1.04	18.03	70.13
04/22/86	075	Bare ^c	1170	172.77	262.81	1.6703	1.24	19.05	85.38
04/23/86	076	Water	1171	172.68	262.94	1.6699	1.24	13.46	74.19
07/07/86	089	Bare ^c	1193	103.28	363.28	1.6777	0.78	19.81	78.87
07/09/86	090	Water	1194	103.27	363.63	1.6776	0.78	13.97	88.96
08/18/87	101	Water	1216	74.94	256.96	1.4884	0.52	13.97	70.86
08/19/87	102	Bare ^c	1217	75.29	257.84	1.4909	0.53	19.56	63.70

^aDensity measured at 23°C.^bThe north side plate of the reflector tank was removed.^cBoth side plates of the reflector tank were attached.

表3.1.3 均質溶液燃料系の臨界実験結果（小口径の円筒槽）

Run Date	CML Experiment	Reflector	Sample	Pu (g/L)	U (g/L)	Density (g/cm ³) ^a	Free Acid (M)	Critical Height (cm)
01/15/85	046	Water	1087	59.0	53.12	1.1968	0.77	23.82
01/17/85	046R	Water	1087	59.0	53.12	1.1968	0.77	24.06
01/29/85	047	Concrete	1088	59.5	54.12	1.1977	0.75	24.88
04/26/85	051	Bare	1096	59.3	53.27	1.1978	0.85	34.93
02/14/86	065	Bare	1155	41.69	63.38	1.1749	0.61	44.46
02/19/86	066	Water	1156	41.89	63.65	1.1750	0.61	28.11
02/25/86	067	Concrete	1161	41.83	63.55	1.1747	0.61	29.36
03/04/86	068	Concrete	1163	118.71	173.98	1.4638	1.02	27.03
03/07/86	069	Water	1164	119.04	174.67	1.4645	1.05	25.26
03/11/86	070	Bare	1165	118.90	174.53	1.4645	1.03	41.08
04/25/86	077	Bare	1174	172.56	262.79	1.6706	1.23	57.97
04/30/86	078	Water	1177	172.82	262.55	1.6705	1.23	28.93
06/05/86	083	Concrete	1184	173.22	262.88	1.6704	1.22	30.60
06/12/86	084	Concrete	1185	102.40	365.36	1.6792	0.78	32.62
06/16/86	085	Bare	1186	102.37	365.03	1.6802	0.78	67.55
06/18/86	086	Water	1187	102.47	365.19	1.6803	0.77	31.28
08/25/87	103	Water	1221	76.34	261.71	1.4975	0.54	28.43
08/28/87	104	Bare	1223	76.41	260.28	1.4986	0.55	50.78
09/01/87	105	Concrete	1224	76.67	261.49	1.4997	0.54	30.01

^aDensity measured at 23°C.

35.39-cm ID Cylinder

表3.1.4 均質溶液燃料系の臨界実験結果（大口徑の円筒槽）

Run Date	CML Experiment	Reflector	Sample	Pu (g/L)	U (g/L)	Density (g/cm ³) ^a	Free Acid (M)	Critical Height (cm)
11/01/85	058	Water	1130	11.88	11.05	1.0501	0.50	76.80
11/06/85	059	Water	1131	11.73	10.78	1.0491	0.49	83.14
12/05/85	061	Water	1135	12.19	41.04	1.0922	0.54	81.72

^aDensity measured at 23°C.

68.68-cm ID Cylinder

表3.1.5 均質溶液燃料系の臨界実験結果（円環槽）

Run Date	CML Experiment	Insert Description ^a	Water Height ^b (cm)	Sample	Pu (g/L)	U (g/L)	Density ^c (g/cm ³)	Free Acid (M)	Critical Height (cm)
08/09/85	052	Part 26/B-1	24.8	1111	172.6	156.41	1.5295	1.07	31.32
08/13/85	052R	Part 26/B-1	24.8	1111	172.6	156.41	1.5295	1.07	31.06
08/19/85	053	Part 26/B-1	24.8	1112	113.0	102.55	1.3569	0.88	29.24
09/12/85	057	Part 26/B-1	24.8	1122	60.7	55.62	1.1957	0.53	31.05
01/29/86	062	Part 26/B-1	24.8	1152	226.22 ^d	207.09	1.6752	1.41	34.49
06/20/86	087	Part 26	24.1	1188	102.19	365.20	1.6803	0.77	48.55
06/27/86	087S	Part 26	24.1	1191	102.69	364.88	1.6780	0.77	48.99
07/22/86	091	Part 24/B-2	24.1	1197	103.37	363.66	1.6776	0.78	27.67
06/18/87	092	Part 25/B-2	24.1	1202	106.30	373.33	1.6953	0.65	37.19
06/26/87	093	Part 27/B-2	24.1	1203	107.91	379.55	1.7034	0.66	51.10
07/08/87	094	B-2	24.1	1208	108.27	380.41	1.7040	0.62	32.86
07/15/87	095	Part 26/B-3	24.1	1210	195.61	6.5	1.4390	3.28	27.51
07/20/87	096	Part 26/B-3	24.1	1211	110.13	3.8	1.2598	1.95	25.69
07/22/87	097	Part 26/B-3	24.1	1212	58.30	2.3	1.1467	1.14	28.94
07/28/87	098	Part 26/B-2	24.1	1213	72.74	247.33	1.4739	0.53	39.58
08/06/87	099	Part 29/B-2	24.1	1214	73.64	250.30	1.4788	0.52	79.18
08/12/87	100	Part 28	1.9	1215	74.25	251.64	1.4828	0.53	104.62
11/12/87	108	Part 26/B-2	1.9	1232	47.08	161.72	1.3134	0.52	45.09

^aPart 24: Annular concrete insert 0 wt % B₂C
^aPart 25: Annular concrete insert 1 wt % B₂C
^aPart 26: Annular concrete insert 2 wt % B₂C
^aPart 27: Annular concrete insert 6 wt % B₂C
^aPart 28: Solid Cd-covered polyethylene insert
^aPart 29: Annular Cd-covered polyethylene insert

Bottle B-1: Contained 6.53 ± 0.02 L of Pu+U, filled to a height of 39.3 ± 0.2 cm (sample 1110) with 76.2 g Pu/L, 69.24 g U/L, density of 1.2483 g/cm³, free acid concentration of 0.81 M.

Bottle B-2: Contained 9.86 ± 0.02 L of Pu+U, filled to a height of 59.4 ± 0.2 cm (sample 1195) with 103.36 g Pu/L, 363.30 g U/L, density of 1.6777 g/cm³, free acid concentration of 0.77 M.

Bottle B-3: Contained 6.11 ± 0.02 L of Pu+U, filled to a height of 36.8 ± 0.2 cm (sample 1209) with 194.92 g Pu/L, 5.1 g U/L, density of 1.4362 g/cm³, free acid concentration of 3.31 M.

^bDistance between top of water and top of annular vessel.^cDensity measured at 23°C.^dPu concentration is Pu⁺⁶=52.3 g/L, balance is Pu⁺⁴.

3.2 棒状燃料と溶液燃料からなる体系³⁾

3.2.1 実験のねらい

高速炉の場合、炉心には水などの減速材は存在しないが、一旦炉外に出ると、水の存在を無視することはできない。使用済み燃料プールのように水だけが存在する場合には、高速炉燃料といえども減速材が軽水であるので、その臨界安全解析手法は軽水炉の炉心解析手法の延長として考えられる。

軽水を減速材とした臨界実験は比較的簡単に実施できるので、表2.2.1 から判るように、高速炉用燃料棒を使った臨界実験としても既に比較的数量多く実施されている。また、その臨界実験データによるSCALEコードシステム（第2版）の検証は既に済んでいる^{5) 10)}。

しかし、溶解槽のように核燃料が減速材中に高い濃度で溶け出すと、軽水炉の炉心解析手法をベースとした計算手法では、減速材中の共鳴核種の取扱に問題が生ずることがわかってきた。

溶解槽の解析でも、燃料ペレットの直径と格子ピッチをパラメータとして最適減速条件を求める場合には、減速材を軽水だけとするのが最も保守的であるのが普通なので、そのような保守的な解析方法をとる限り、既存の計算コード（既に検証済みのSCALEの第2版）でも何ら問題はないはずである。

しかし、より現実的な条件で詳細な解析を実施するためには、計算コードに手を加え、減速材領域に核燃料を含む非均質系での使用を前提としたもので、かつその計算誤差が燃料濃度にあまり依存しないものに改めなければならない。

そこで、日米共同臨界実験では、改良された計算コードを検証するのに適した実験データを確保すると共に、溶解槽の容量を上げるために中性子吸収材のガドリニウムを溶解液中に溶かして使用したとしても計算誤差が増えないことを確認できるデータを取る実験を計画した。

なお、この問題に係わるSCALEコードシステムの改良は、本計画の範囲外であるが、本実験と同時期にORNLで実施されたので、ORNL側で実施した実験解析には改良された最新版（第4版）¹¹⁾が使用されている。

3.2.2 実験条件

棒状燃料と溶液燃料からなる体系に係わる日米共同臨界実験の実験パラメータを、既存実験と比較する形で表 3.2.1に示す。

高速炉燃料ではPu富化度が高いので、軽水炉燃料の場合と違って、よりタイトな格子ピッチで最適減速条件が発生するとともに、格子ピッチが最適減速条件よりタイトになって行っても反応度の減少は緩やかである。

そこで、日米共同臨界実験では、最適減速条件よりも可能な限りタイトなものとする

とし、「格子ピッチ」を既存実験の半分以下の 1.4cm に設定した。その結果、必要な燃料ピン本数が増え、既存実験の 3 倍を超える約 1000 本の燃料ピンを使用することとなった。

なお、当該格子ピッチ（正方格子で 1.4cm）は、次節の実験結果（図 3.3.2 参照）から分かるように、臨界体系の大きさが最小になる最適減速条件とちょうど一致しているが、臨界ピン本数が最小となる格子ピッチよりはずっと小さくなっている。

また、減速材中の共鳴核種及び強い吸収材の存在が、減速材領域の実効断面積を求める上で問題となるので、ここでは、それらの断面積の取り扱いの妥当性を体系的に確認できるように、減速材領域に装荷する燃料溶液中の「燃料濃度」と「Gd濃度」を実験のパラメータとすることとした。

3.2.3 実験装置

必要な燃料ピン本数が極端に多いので、臨界実験施設の近くにある高速中性子束試験施設 (FFTF) から実際に原子炉で使用する予定の燃料ピンを借用してきたものを使用することとした。しかし、本実験では減速材領域に Pu 燃料を含む燃料溶液を使用することとしているので、燃料ピンの α 汚染が問題となる。

そこで、燃料ピンが Pu 溶液と直接接触して汚染することを避けるため、炉心タンクとして、図 3.2.1 に示すようなボイラチューブ型の槽を新規に作製した。

ボイラチューブ型の槽では、燃料ピンを、下端がシールされた非常に薄いステンレス製のチューブ内に挿入する構造となっているので、燃料ピンが槽内の燃料溶液と直接接触することはない。（付録-1：写真-D 参照）

なお、ちょうど臨界になる体系の大きさは、ボイラチューブ型槽内の燃料溶液の液位を繰り返し微増させることにより決定する。

3.2.4 実験結果

ボイラチューブ型の槽を使った実験結果を表 3.2.2 に示す。また、燃料溶液の臨界液位を、燃料濃度及び Gd 濃度をパラメータとして、図 3.2.2 及び図 3.2.3 に示す。

これらの図から、非均質格子系の減速材領域に燃料が存在する場合、燃料濃度が上昇すると、Gd 濃度の上昇の場合と同様に、臨界液位が上昇する（臨界に成りにくくなる）ことが分かる。すなわち、この実験は、非均質格子系では軽水炉燃料と同様に高速炉燃料ピンの場合にも、減速材を純粋の水とするのが最も反応度を高くすることの例示となっている。

表 3.2.1 臨界実験のパラメータとケース数 (棒状+溶液/非均質燃料系)

()内: ケース数

ケース	炉心 形状	Pu富化度(w/o) (ピン) (溶液)		格子ピッチ (cm)	吸収材 (溶液中)	反射材
日米共同 臨界実験 (13ケース)	円筒	22	22	1.4 (正方格子) (996本)	Gd (5) なし(8)	水
既存実験 (23ケース)	円筒	25	30	3.0 (三角格子) (301本)	Gd (6) Gd+B(7) なし(10)	水

表3.2.2 臨界実験結果 (棒状+溶液/非均質燃料系)

Date	CML Experiment	Sample	Pu (g/L)	U (g/L)	Gd (g/L)	Density ^a (g/cm ³)	Free Acid (M)	Critical Height ^b (cm)
11/04/87	106	1230	0.88	2.7	0.0	1.0170	0.41	18.41
11/05/87	106R	1230	0.88	2.7	0.0	1.0170	0.41	18.55
11/09/87	107	1231	73.95	254.09	0.0	1.4833	0.57	21.34
11/19/87	109	1233	47.50	163.06	0.0	1.3168	0.52	20.01
11/24/87	110	1234	22.63	77.84	0.0	1.1577	0.47	18.90
11/25/87	110R	1234	22.63	77.84	0.0	1.1577	0.47	19.03
12/02/87	111	1235	103.70	363.98	0.0	1.6784	0.66	23.87
12/09/87	112	1236	103.18	360.62	0.49	1.6758	0.65	30.28
12/11/87	113	1237	102.23	359.69	0.98	1.6746	0.65	38.78
12/17/87	114	1238	102.65	359.59	1.47	1.6745	0.66	51.06
12/23/87	115	1239	102.68	359.55	1.97	1.6748	0.65	73.08
12/31/87	116	1248	103.61	362.45	2.16	1.6790	0.65	90.27
04/04/88	117	1263	83.30	286.57	0.0	1.5507	0.90	27.42

^aBoiler tube-type tank contained 996 FFTF Type 3.2 pins except for Experiment 117 where the fuel pins were removed. The vessel was water reflected in all experiments.

^bDensity measured at 23°C.

^cZero reference is the top of the polyethylene spacer.

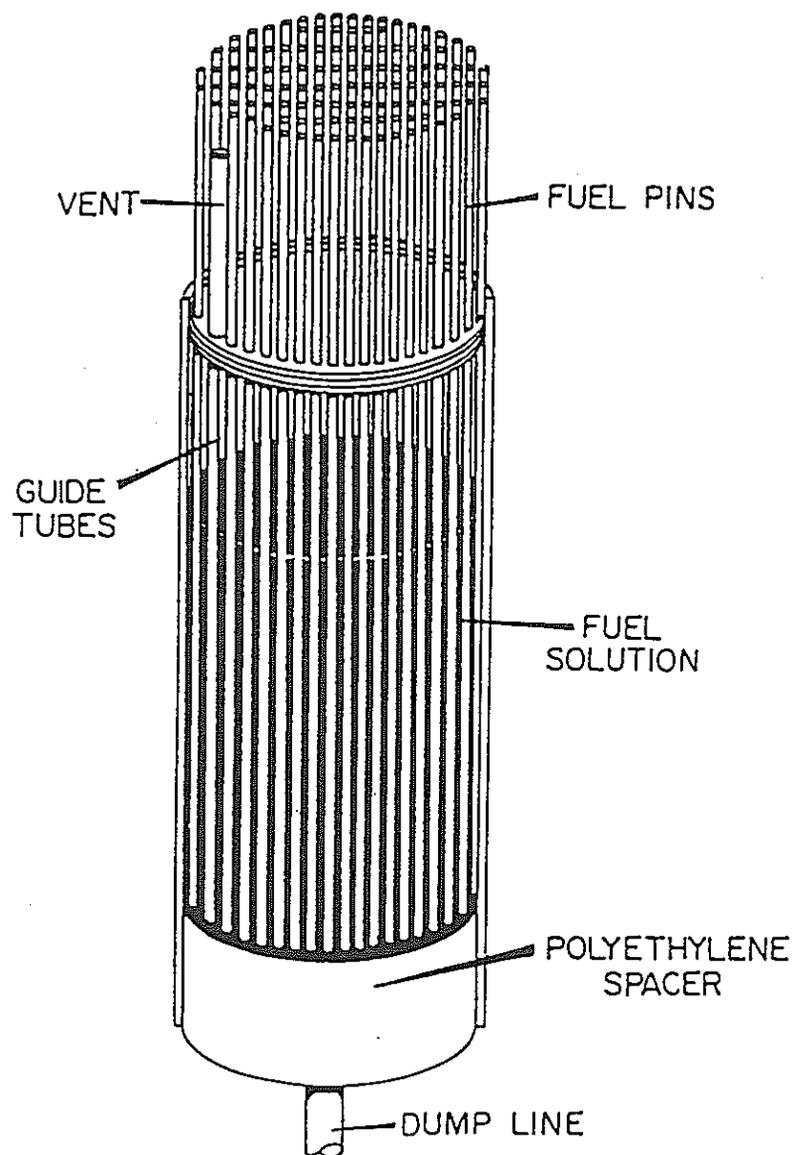


図3.2.1 臨界実験装置（ボイラチューブ型の槽）
（水反射体タンクを外した状態）

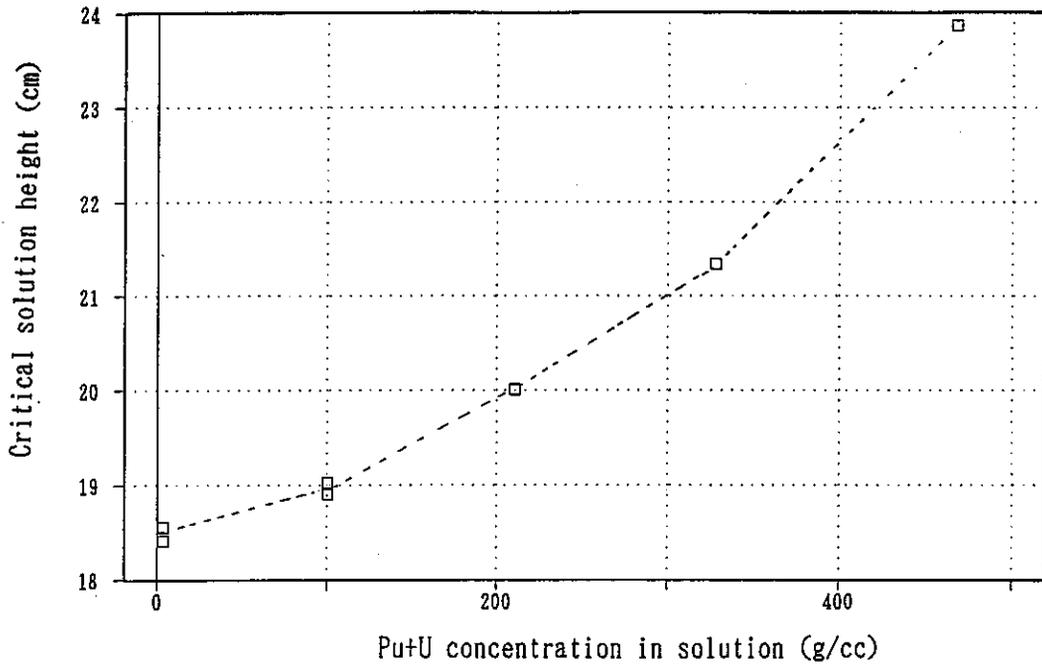


図3.2.2 ボイラチューブ型槽の臨界燃料液位（燃料濃度をパラメータ）

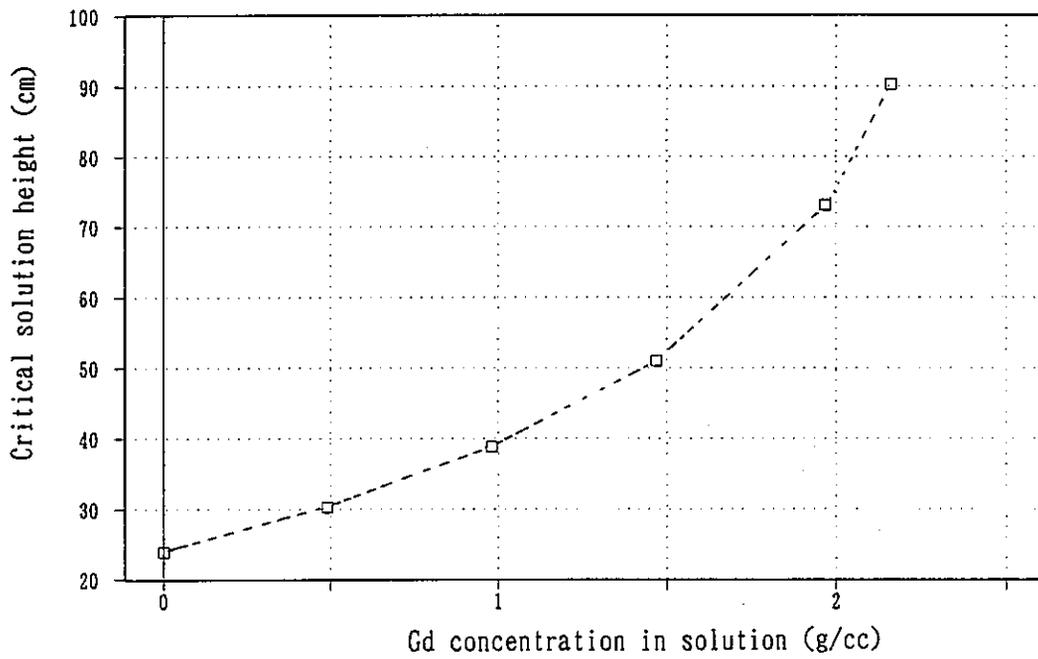


図3.2.3 ボイラチューブ型槽の臨界燃料液位（G d濃度をパラメータ）

3.3 棒状燃料と有機溶媒からなる体系⁴⁾

3.3.1 実験のねらい

ピューレックス法による再処理では、抽出溶媒としてドデカン等の希釈剤で希釈された T B P が使用されている。それらの試薬は、H, C, O, P の元素で構成され、水と同様に良質の中性子減速材である。減速材の場合、散乱断面積の妥当性が臨界計算結果に大きく影響するが、散乱断面積は、当該減速材の分子構造に強く依存している。

臨界安全解析で体系をモデル化する場合、有機溶媒は、水のために用意された H, O の断面積や単体としての C の断面積を使用して構成されるか、あるいは、水に置き換えられることが多い。このような有機溶媒の取扱が、臨界安全解析上妥当なものであることを何らかの形で確認する必要がある。

日米共同臨界実験では、有機溶媒に Pu を抽出した状態での臨界実験を実施しようと先ず計画したが、その場合、Pu による溶媒の劣化により溶媒の組成が変化すること、劣化溶媒と結合した Pu の回収が困難になること、及び溶媒に Pu を抽出したりまたそれから Pu を回収するためには、それらを別施設へそのたびに運ぶ必要がある等のために実現できなかった。

そこでそれに代わるものとして、Pu と溶媒が直接接触しない非均質体系を考えた。すなわち、タンクにいれた有機溶媒の中に燃料ピンを格子状に立てる実験とした。この場合、水を減速材とした燃料格子実験と同じ実験装置が使用できるし、また水を減速材としたときの結果と直接比較できるという利点もある。

3.3.2 実験条件

有機溶媒で減速した棒状燃料に係わる実験条件を表3.3.1 に示す。併せて、水減速のケースも示している。ここでは、減速条件に可能な限り幅をもたせるために、「格子ピッチ」をパラメータとしている。

3.3.3 実験装置

有機溶媒で減速された棒状燃料の実験に使用した炉心タンクの断面を図3.3.1 に示す。この円筒形のタンクは、燃料棒格子用の長方形で大型の水タンク内に設置して使用する既存のもので、大型水タンクの安全制御系をそのまま使用しながら、減速材（ここでは有機溶媒）の量を最小限に抑えることが出来るように考えられたものである。（付録-1：写真-B 参照）

燃料ピンの格子ピッチの変更は、数枚のポリプロピレン製の格子板を交換することにより行う。格子板には、燃料ピンを挿入する穴が規則正しく正方格子状に配列されている。なお、格子板を交換するには、全ての燃料ピンを一度取り出す必要があり重労働となる。

水を減速材とした実験は、大型の水タンクを使って既に実施されていたが、今回使用した円筒タンクでも2ケースだけ実施した。これは主として、前回の実験以降の ^{241}Pu の崩壊の効果を確認するために実施したものである。

なお、ちょうど臨界になる体系の大きさは、円筒槽内の燃料ピンの本数或は減速材の液位を繰り返し微増させることにより決定する。

3.3.4 実験結果

有機溶媒減速実験の実験結果を表3.3.2に示す。なお、本表には水を減速材とした実験（既存実験及び本計画による再実験）の結果も併せて示している。

有機溶媒を減速材としたときの臨界ピン本数、及び臨界炉心体積を、水を減速材としたときと併せて、図3.3.2、及び図3.3.3に示す。

また、減速材を有機溶媒、或は水として臨界ピン本数を比較したものを図3.3.4に示す。

これらの実験の減速条件は、図3.3.2から分かるように、質量及び体積について最小値を与える最適減速条件をカバーしている。そこで、有機溶媒は、少なくとも臨界安全上最も厳しい最適減速条件の周辺で、減速材として水とほぼ同等であることが実験的に確認されたことになる。

表 3.3.1 臨界実験のパラメータとケース数 (有機溶媒減速/棒状燃料系)

ケース	減速材	炉心形状	Pu富化度 (w/o)	正方格子ピッチ (cm)	反射材
日米共同 臨界実験	有機溶媒 *a) (5ケース)	直方体	22	0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.9	有機溶媒 (円筒形)
	水 (2ケース)			0.8, 1.5	水 (円筒形)
既存実験	水 (5ケース)	直方体	22	0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.9	水 (円筒形)

*a) 32 vol% TBP / 68 vol% NPH, (38 wt% TBP / 62 wt% NPH).

表3.3.2 臨界実験の結果 (有機溶媒減速棒状燃料系)

Square lattice pitch (cm)	Lattice width (fuel pins)	Water moderator			Organic moderator		
		Experiment number	Date	Critical number of fuel pins	Experiment number	Date	Critical number of fuel pins
0.761 ± 0.001	36	067	7/17/85	1046.9 ± 0.2*	065	6/5/85	1054.8 ± 0.2**
0.767 ± 0.013	36	003R	1/24/78	1036.8 ± 0.5*			
0.968 ± 0.001	25	021	11/3/78	571.9 ± 0.2	063	5/21/85	599.2 ± 0.8*
1.242 ± 0.001	20	043	1/9/79	293.9 ± 0.1	062	5/15/85	301.8 ± 0.2
1.537 ± 0.001	15	013	10/9/78	196.7 ± 0.2			
1.537 ± 0.001	15	068R	7/25/85	199.7 ± 0.3*	061	5/14/85	199.5 ± 0.3
1.935 ± 0.002	15	032	12/14/78	165.1 ± 0.4	060	5/8/85	165.3 ± 0.1

*Includes Type 3.1 FFTF fuel pins on a 1.522-cm lattice pitch positioned on either side of a 27 x 36 fuel pin array of Type 3.2 FFTF fuel pins on a 0.761-cm lattice pitch.

**Assembly loaded with an additional fuel pin was slightly supercritical.

*Includes Type 3.1 FFTF fuel pins on a 1.534-cm lattice pitch positioned on either side of a 27 x 36 fuel pin array of Type 3.2 FFTF fuel pins on a 0.767-cm lattice pitch.

*Experiment 068 on 7/23/85 resulted in a predicted 199.7 ± 0.3 fuel pins for criticality.

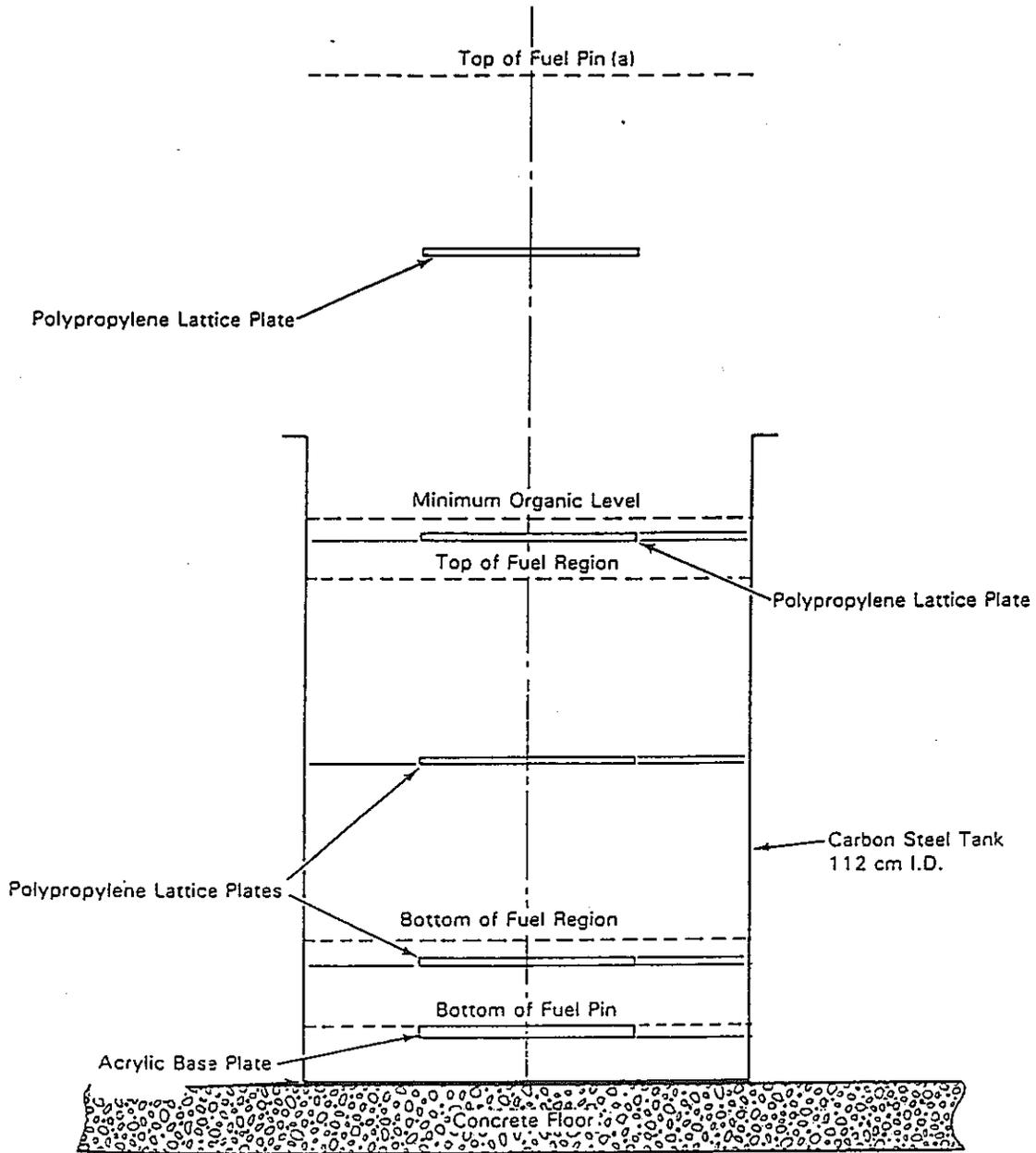


図3.3.1 臨界実験の装置（棒状燃料用円筒槽）

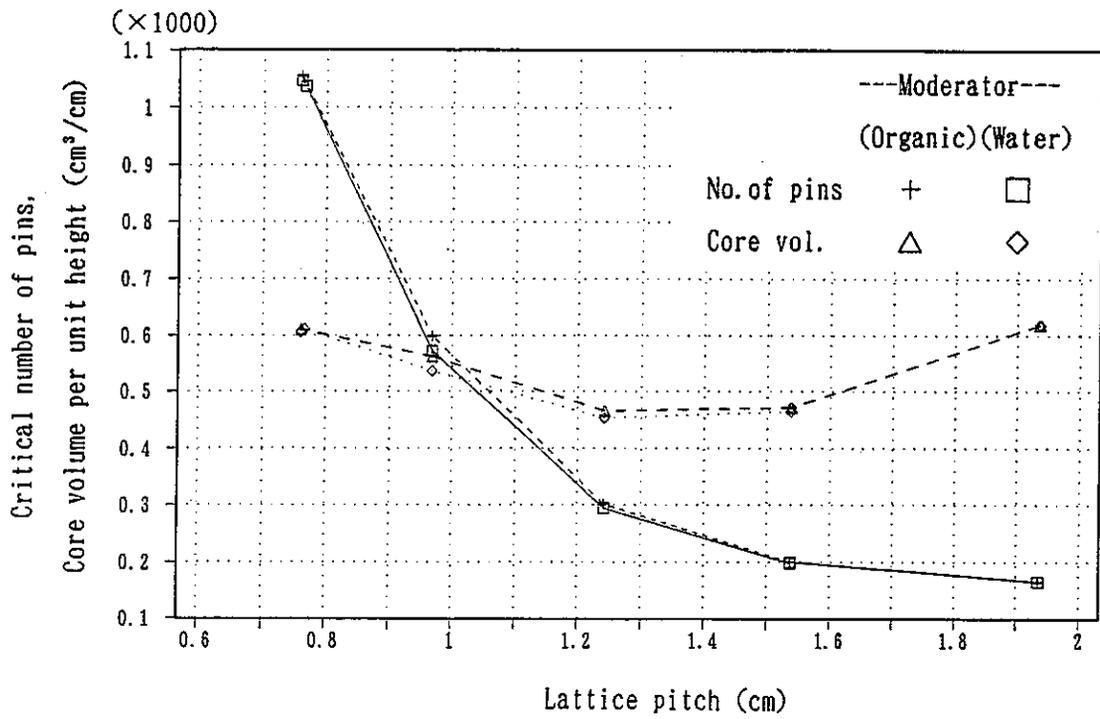


図3.3.2 臨界ピン本数と臨界体積 (格子ピッチをパラメータ)

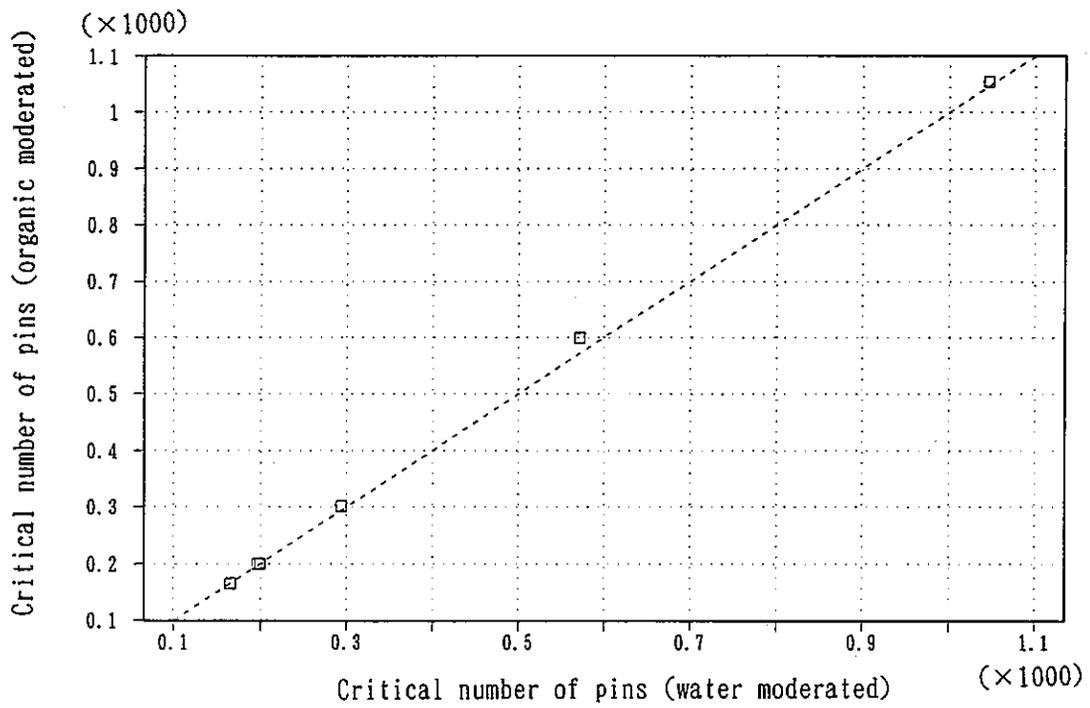


図3.3.3 臨界ピン本数の減速材による比較

3.4 溶液燃料の同位体組成

臨界実験に使用するプルトニウム及びウラン燃料の同位体組成は、実験解析を考えると、実験ケース間で変動しない方が好ましい。そのためには、使用する全プルトニウム及び全ウランを、それぞれ最初に均一に混合しておくことが考えられる。

しかし、均一に混合しておいたとしても、プルトニウムの場合には、半減期が約14.5年のベータ崩壊によって ^{241}Pu が ^{241}Am に変化する。この変化は、反応度に与える効果が大きいので、プルトニウムを使った臨界実験或はその解析を行う際には特に注意する必要がある。

日米共同臨界実験では、プルトニウムについては、ほとんど全てのケースで同一組成のもので賄えたが、ウランについては、再処理で回収されたウランを使用しており、同位体組成には多少の変動があった。

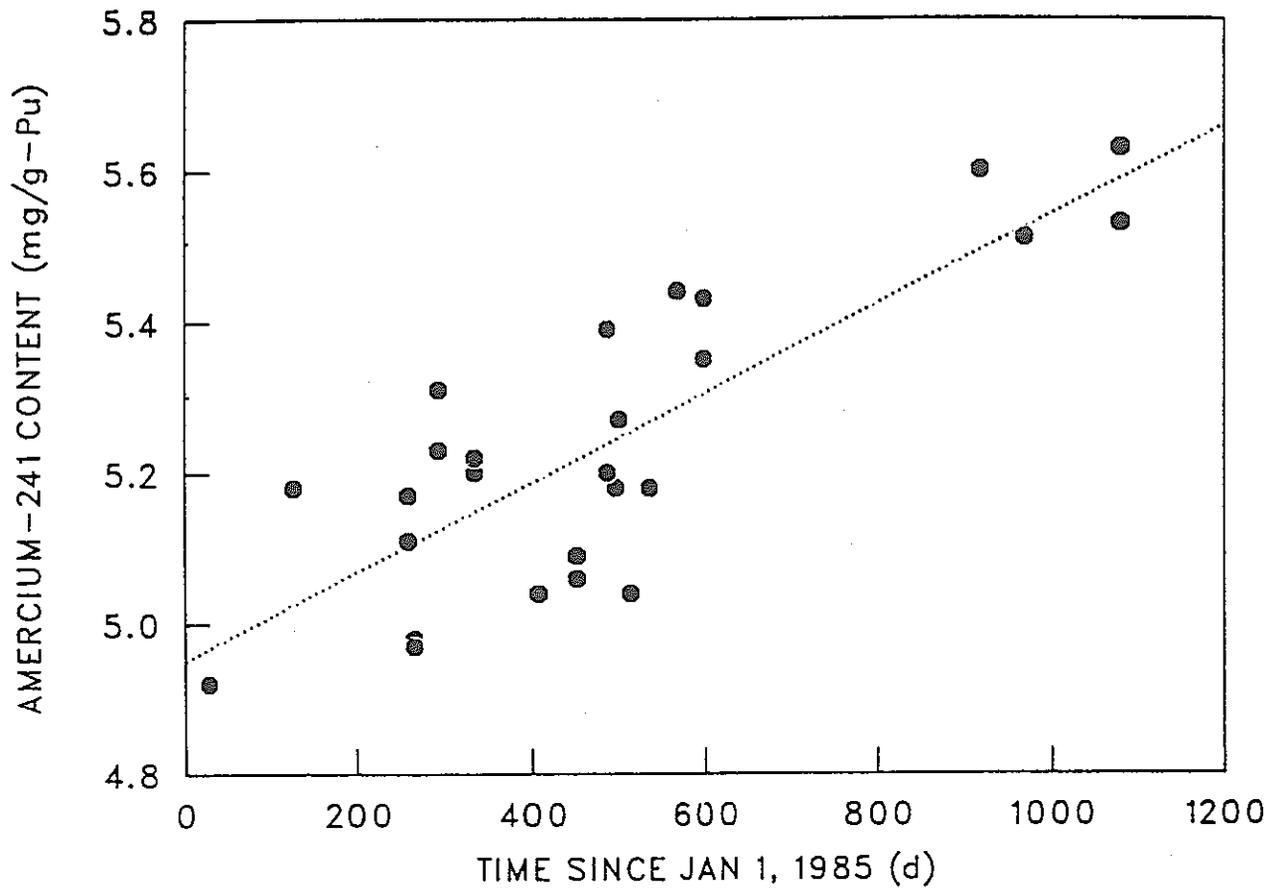
そこで、燃料溶液のプルトニウム富化度（プルトニウムとウランの混合比）を変更した時には必ず、その他にも定期的に、使用した燃料溶液に含まれるプルトニウムとウランの同位体組成とアメリシウムの含有率を重要な実験データの一つとして実測している。その結果、約3年の実験期間で27件を超える測定値が得られている。

最初に均一に混合したプルトニウムだけを使うと、その実験の範囲内では、 $\text{Pu}+^{241}\text{Am}$ の総量は時間が経っても変わらず一定であり、 ^{241}Pu の一部が ^{241}Am に変化するだけである。この性質を考慮すると、 ^{241}Am の含有率のデータから測定誤差によるバラツキを減らすことができる。

即ち、 ^{241}Am の濃度は、プルトニウムに対する相対的な値に換算して、ある基準点からの経過時間に対してプロットする。（図3.4.1参照）1次式でフィッティングしておくこと、そのフィッティング式により必要な時点の ^{241}Am の含有率を求めることができる。

最終的な実験解析には、臨界実験を、実験時期があまり離れていない幾つかのグループに分けて、プルトニウムとウランについては、各グループ内での平均値を、また ^{241}Am の含有率については、上述の方法で定めたプルトニウムに対する相対値（図3.4.1下部の表を参照）を、それぞれのグループを代表する燃料組成として使用している。

なお、 ^{241}Am の含有率の測定値の経時変化のフィッティングから ^{241}Pu の半減期を求めると、14.36年となり、文献値の 14.355 ± 0.005 年（LA-10979-MS/Los Alamos National Laboratory）、14.42年（Table of Radioactive Isotopes, John Wiley & Sons, 1986）と良い一致を示している。これは、個々の測定値には多少のばらつきがあるが、全体としては高い信頼性を有し、かつフィッティングも妥当なものであることを示している。



Year	²⁴¹ Am (mg/g-Pu)
1985	5.1
1986	5.3
1987	5.5

図3.4.1 ²⁴¹Amの含有率変化と解析用の²⁴¹Am含有率

4. 臨界実験の解析

臨界実験結果を計算コードなどで解析する目的は、本来、臨界安全評価に使用する解析手法（ここでは、SCALEコードシステム）の妥当性を確認することにある。

しかし、臨界実験を行い、その結果を解析手法の検証用のデータとして公表する立場からすると、実験結果の解析を行うことは、その実験データに系統的な、或はランダムな誤差が存在しないこと、燃料や炉心をモデル化するためのデータに不足がないことなどを確認するためにも、きわめて重要な作業である。

臨界実験に日本が参加して日米共同とする前のことだが、実験直後の予備的な解析で、実際に、計算誤差が数%と極端に大きくなったことがある。実験経費の多くを投入して原因の解明がなされた結果、Pu濃度が高くなると遊離硝酸の測定結果に問題を生ずることがわかった。前章の実験結果の表中の遊離硝酸の濃度は、その後改善された分析方法で得られたものである。

なお、それ以前に公表されている臨界実験データでは、プルトニウムの濃度が問題となるような高濃度ではないので、遊離硝酸の値が分析方法に依存することはなく、その結果、計算コードの検証用として問題はないということである。

本章では、まず、臨界安全解析コードによる実験解析の結果を燃料体系毎に示す。

実験の解析には、日米双方とも、ORNLで開発されたSCALEコードシステムを使用した。動燃事業団は、一貫して既存実験による検証を済ませているSCALE-2⁹⁾を使用し、ORNLは同コードシステムの開発元であるため、最新版(SCALE-3、1¹⁰⁾、又は-4¹¹⁾)を使用している。

実験解析用のモデル化は、日米で完全に独立に行っている。これは、実験体系のモデル化に必要な詳細データに不足がないことを複数の目でチェックするという意味でも重要なことである。

最後に、本計画で得られた溶液燃料の密度と組成の実測値を使って、プルトニウムとウランの混合溶液燃料に対する溶液密度式にかかわる検討を行う。

4.1 均質溶液燃料の体系の解析^{1) 2)}

均質溶液燃料の体系の実験解析には、動燃事業団は一貫してSCALE-2を使用し、ORNLは最新版(SCALE-4)を使用している。

解析結果を、平板槽、円筒槽（小口径）、円筒槽（大口径）、円環槽の順に、それぞれ表4.1.1、表4.1.2、表4.1.3、表4.1.4に示す。また、これらの全ての k_{eff} をPu富化度及び

H/Fissileに対してプロットしたものを図4.1.1及び図4.1.2に示す。

上記の全解析結果（57ケース）によって均質溶液燃料系に対するSCALEコードシステムの信頼性を評価すると表4.1.5に示す結果が得られる。

以上の解析評価結果は、次のようにまとめることができる。

- ① 均質溶液燃料の体系には、固体状の中性子吸収材を含む体系、反射材がコンクリート或は裸の体系などの複雑な体系（詳細は、表3.1.1参照）が含まれているにもかかわらず、 k_{eff} のばらつきは、SCALE-2でも SCALE-4でも±1.5%程度であり、実験値（ここでは、1.0）との良い一致が得られた。
- ② k_{eff} の最小値は、SCALE-2でも SCALE-4でも約 0.99 である。
- ③ k_{eff} は、SCALE-2でも SCALE-4でも、Pu富化度及びH/Fissileに対してほぼ平坦に分布しており、Pu富化度及びH/Fissileに対する依存性は少ない。

なお、SCALE-2とSCALE-4の計算結果に多少の差があるように見えるので、更に両者を一対一で比較して図4.1.3に示す。この図では、日米共同臨界実験の均質溶液燃料系の全ケースを、横軸をSCALE-2の k_{eff} の値とし、かつ縦軸をSCALE-4の k_{eff} の値としてプロットしている。両者の値が一致すると対角線上に位置することになる。

多少のばらつきがあるものの、ほぼ対角線付近に分布している。多少のばらつきの原因としては、主として、モンテカルロ法に特有な統計的なものと、実験体系のモデル化の細部の違い（SCALE-2のモデル化はPNC、SCALE-4のモデル化はORNL）によるものの2つがあるものと考えられる。

SCALEコードシステムでは、第2版（SCALE-2）以降の第4版（SCALE-4）までの改訂に際して、断面積そのものの変更が行われておらず、また上述のように両者の計算結果がほぼ対角線状の対応を示すことから、均質なPu+U溶液燃料の体系では、次節の棒状燃料と溶液燃料の体系の場合とは違って、両者はほぼ同等であると言える。

表4.1.1 均質溶液燃料系の解析結果（平板槽）

CML Experiment	Reflector	Pu/Pu+U	Pu (g/L)	H/X ^b	Calculated K-effective ^a	
					SCALE-4	SCALE-2
049A	Bare	0.52	173.0	143	0.995	0.989
050	Bare	0.52	173.6	142	1.000	0.994
054	Water	0.52	118.2	221	1.005	1.002
055	Water	0.52	60.2	455	1.007	1.005
056	Bare	0.52	60.6	452	1.003	0.999
056A	Bare	0.52	60.6	452	1.003	1.002
063	Bare	0.39	41.1	666	1.001	0.998
064	Water	0.40	41.9	653	1.002	1.000
071	Water	0.41	118.9	212	1.009	1.011
072	Water	0.41	118.9	212	1.007	1.003
074	Bare	0.41	119.0	212	0.990	0.993
075	Bare	0.40	172.8	136	0.998	0.996
076	Water	0.40	172.7	136	1.010	1.010
089	Bare	0.22	103.3	225	0.996	0.994
090	Water	0.22	103.3	225	1.004	1.004
101	Water	0.23	74.9	333	1.010	1.004
102	Bare	0.23	75.3	331	1.003	1.001

^aKENO *k*-effective statistics $\pm\sigma < 0.003$.^bX = ²³⁹Pu + ²⁴¹Pu + ²³⁵U.

表4.1.2 均質溶液燃料系の解析結果（小口径の円筒槽）

CML Experiment	Reflector	Pu/Pu+U	Pu (g/L)	H/X ^b	Calculated K-effective ^a	
					SCALE-4	SCALE-2
046	Water	0.53	59.0	462	1.008	1.000
046R	Water	0.53	59.0	462	1.006	1.002
047	Concrete	0.52	59.5	455	1.008	0.999
051	Bare	0.53	59.3	458	1.011	0.999
065	Bare	0.40	41.7	656	1.005	1.006
066	Water	0.40	41.9	652	1.006	1.000
067	Concrete	0.40	41.8	653	1.012	1.010
068	Concrete	0.41	118.7	213	1.019	1.011
069	Water	0.41	119.0	211	0.999	1.000
070	Bare	0.41	118.9	212	1.009	1.011
077	Bare	0.40	172.6	136	1.014	1.006
078	Water	0.40	172.8	136	1.009	1.006
083	Concrete	0.40	173.2	135	1.016	1.009
084	Concrete	0.22	102.4	227	1.013	1.010
085	Bare	0.22	102.4	227	1.009	1.006
086	Water	0.22	102.5	227	1.005	1.009
103	Water	0.23	76.3	325	1.008	1.005
104	Bare	0.23	76.4	326	1.011	1.017
105	Concrete	0.23	76.7	325	1.018	1.014

^aKENO *k*-effective statistics $\pm\sigma < 0.003$.^bX = ²³⁹Pu + ²⁴¹Pu + ²³⁵U.

表4.1.3 均質溶液燃料系の解析結果（大口径の円筒槽）

CML Experiment	Pu/Pu+U	Pu (g/L)	H/X ^b	Calculated K-effective ^a	
				SCALE-4	SCALE-2
058	0.52	11.88	2376	1.008	1.017
059	0.52	11.73	2407	1.009	1.010
061	0.23	12.19	2271	1.010	1.015

^aKENO *k*-effective statistics $\pm\sigma < 0.002$.^bX = ²³⁹Pu + ²⁴¹Pu + ²³⁵U.

表4.1.4 均質溶液燃料系の解析結果（円環槽）

CML Experiment	Insert Description ^a	Pu/Pu+U	Pu (g/L)	H/X ^b	Calculated K-effective ^c	
					SCALE-4	SCALE-2
052	Part 26/B-1	0.52	172.6	144	1.008	1.002
052R	Part 26/B-1	0.52	172.6	144	1.002	1.000
053	Part 26/B-1	0.52	113.0	232	1.003	1.003
057	Part 26/B-1	0.52	60.7	451	0.997	0.993
062	Part 26/B-1	0.52	226.22	105	1.005	1.007
087	Part 26	0.22	102.19	228	1.003	1.002
087S	Part 26	0.22	102.69	226	1.004	1.005
091	Part 24/B-2	0.22	103.37	225	1.007	0.990
092	Part 25/B-2	0.22	106.30	219	1.011	1.000
093	Part 27/B-2	0.22	107.91	214	1.007	1.004
094	B-2	0.22	108.27	214	1.011	1.005
095	Part 26/B-3	0.97	195.61	126	1.012	1.007
096	Part 26/B-3	0.97	110.13	242	1.014	1.002
097	Part 26/B-3	0.96	58.30	476	1.010	1.007
098	Part 26/B-2	0.23	72.74	345	1.013	1.010
099	Part 29/B-2	0.23	73.64	340	1.017	1.014
100	Part 28	0.23	74.25	337	1.017	1.015
108	Part 26/B-2	0.23	47.08	553	1.002	1.001

^aPart 24: Annular concrete insert 0 wt % B₂C
 Part 25: Annular concrete insert 1 wt % B₂C
 Part 26: Annular concrete insert 2 wt % B₂C
 Part 27: Annular concrete insert 6 wt % B₂C
 Part 28: Solid Cd-covered polyethylene insert
 Part 29: Annular Cd-covered polyethylene insert
 B-1, B-2 and B-3 are bottles containing fissile solutions.

^bX = ²³⁹Pu + ²⁴¹Pu + ²³⁵U^cKENO *k*-effective statistics $\pm\sigma < 0.003$.

表 4.1.5 解析手法の評価（均質溶液燃料系）

データソース	ケース数	コード	平均値 k_{av}	標準偏差 σ	$n^{*a)}$	未臨界限度 $k_{s1}^{*b)}$	最小値 k_{min}
日米共同 臨界実験	57	SCALE4	1.007	0.006	2.5	0.992	0.990
		SCALE2	1.004	0.007	2.5	0.986	0.989

*a) 臨界実験の解析結果（頻度分布）が正規分布であると仮定したとき、その標本数、平均値及び標準偏差から、ある一定の臨界超過確率（危険率）と信頼度で未臨界限度を推定するための係数。ここでは、臨界超過確率を2.5%、信頼度を97.5%として定めている。

*b) $k_{s1} = k_{av} - n\sigma$.

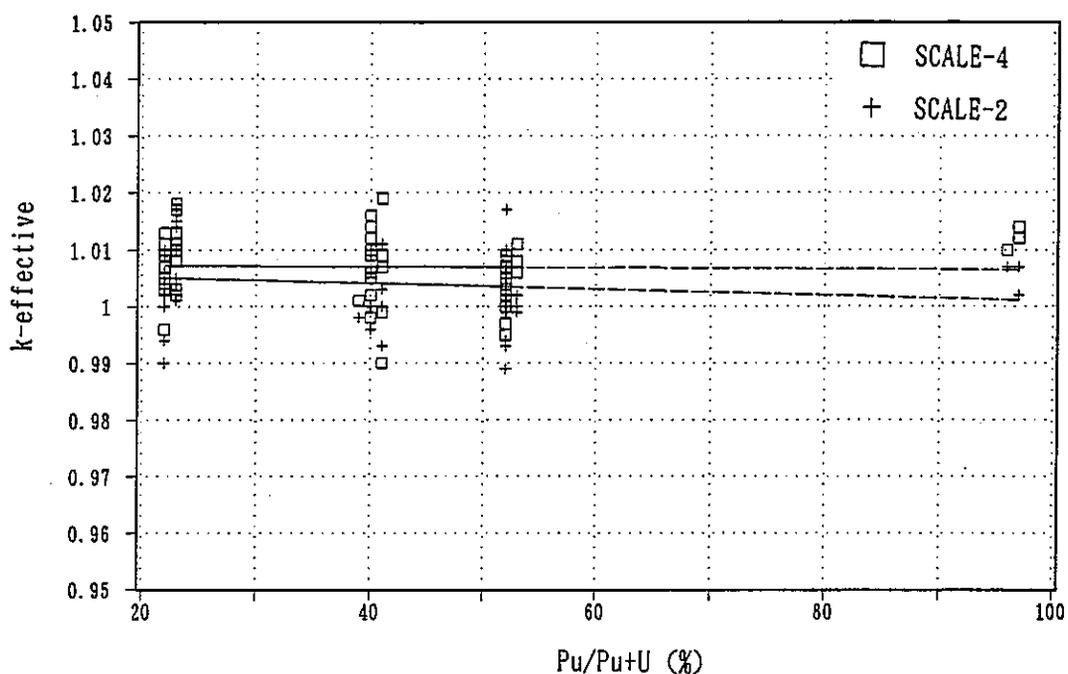


図4.1.1 均質溶液燃料系の解析結果 (Pu富化度依存性)

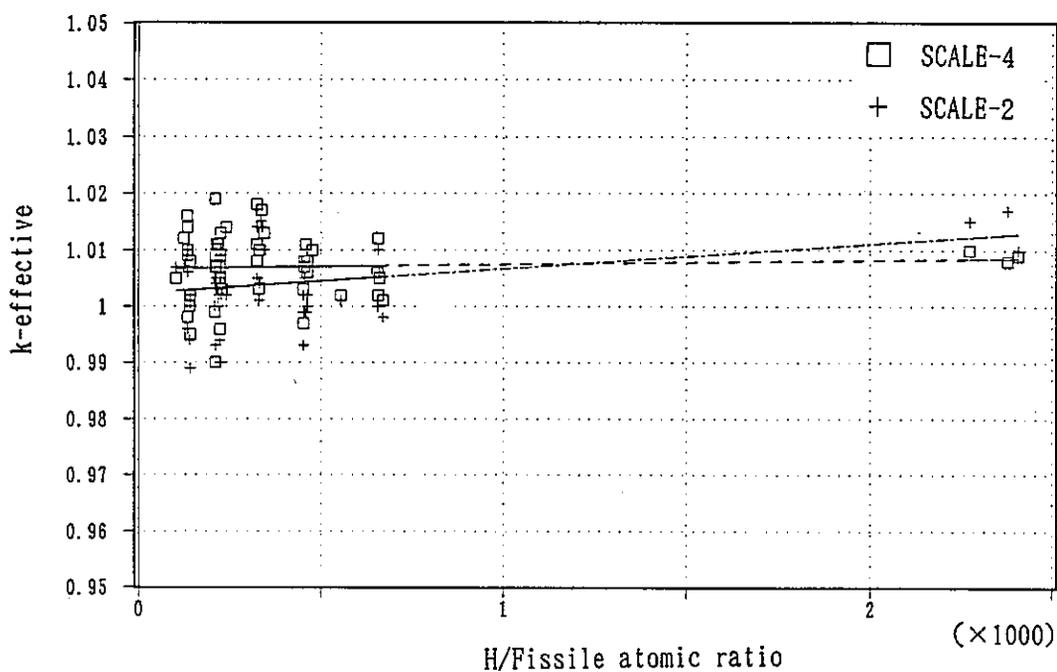


図4.1.2 均質溶液燃料系の解析結果 (H/Fissile原子個数比依存性)

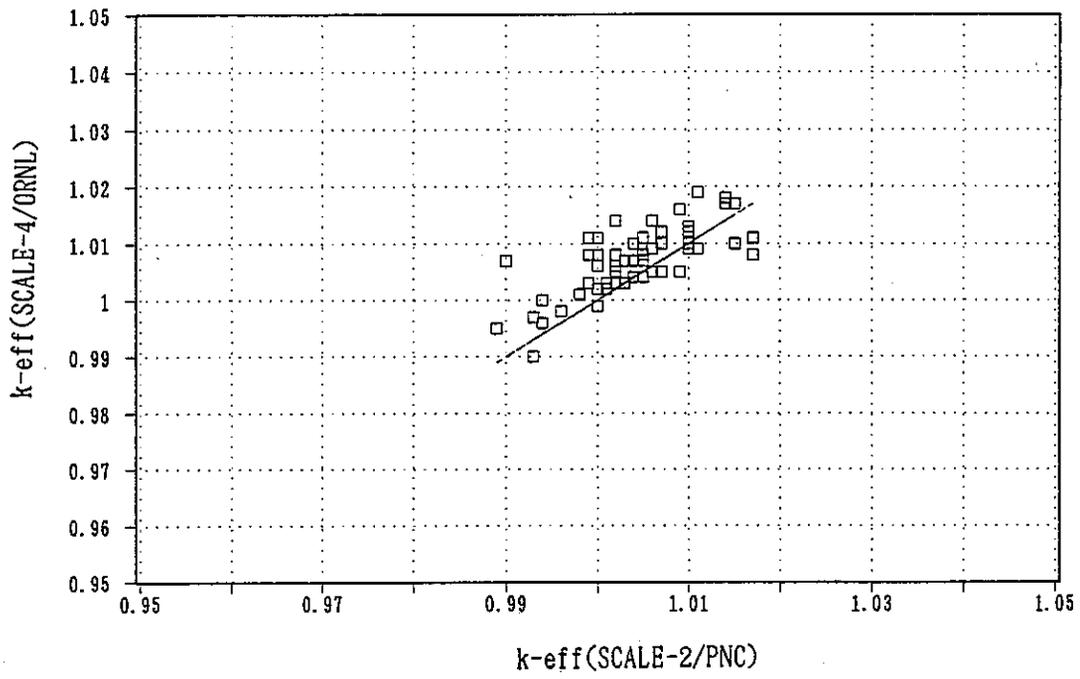


図4.1.3 均質溶液燃料系の解析結果の比較 (SCALE-2/PNC : SCALE-4/ORNL)

4.2 棒状燃料と溶液燃料の体系の解析³⁾

本実験についても、日米双方で、それぞれ独立に実験の解析を実施した。動燃事業団は SCALE-2 を使用し、ORNL は SCALE-4 で最終的な解析を行った。

解析結果を表4.2.1 に示す。また、 k_{eff} を燃料濃度及び Gd 濃度を横軸にしてプロットしたものをそれぞれ図4.2.1 及び図4.2.2 に示す。

均質溶液燃料の場合と違って、SCALE-2 と -4 とで検証結果に明らかに差がある。即ち、SCALE-4 では、燃料濃度やGd濃度に関係なく実験値($k_{eff}=1.0$)とかなり良く一致している。それに対し、SCALE-2 では、燃料濃度の上昇と共にバイアスが増えている。ただし、Gd濃度には、ほとんど影響されていない。

本実験のような特殊な条件下では、SCALE-2 が k_{eff} を過小評価となることがあらかじめ予想されていたので、ORNL において解析手法の改訂が行われ、SCALE-4 には、改訂された解析手法が使用されている。

すなわち、SCALE-2 では、非均質格子系の共鳴断面積の計算 (SCALE-2 コードシステム内の NITAWL で実施) において、通常の軽水格子計算コードと同様に、減速材領域中に有意量の燃料核種が存在することを想定していないので、減速材中に燃料核種があっても、無限希釈の断面積を使い、共鳴計算を行わない。

それに対しSCALE-4 では、NITAWLに改訂を加えて NITAWL-2 とし、減速材領域についても溶液燃料として共鳴断面積の計算を行うこととしている。ただし、減速材領域の燃料では、減速材領域も非均質格子系の一部を成すことを考えて、ダンコフ補正を使った共鳴の自己遮蔽を考慮している。この場合、共鳴核種を含む減速材領域が燃料塊で、燃料ペレット領域が減速材であると見立てて処理している。

前述のように、SCALE-4 による解析結果が実験値と良い一致を示していることは、同コードで採用された断面積の処理方法が、厳密な意味ではダンコフ補正という近似法の枠を出ていないものの、実用性の点からは極めて妥当なものであったことを示していると言える。

改訂が加えられて SCALE-4に組み込まれた新しい解析手法について、その妥当性を的確に評価することが、本体系で実験を行う狭い意味での目的であったことを考えると、その目的は十分に達成されたことになる。

表4.2.1 棒状+溶液/非均質燃料系の解析結果

CML Experiment	Pu (g/L)	U (g/L)	Gd (g/L)	Critical Height (cm)	Calculated K-effective ^a	
					SCALE-4	SCALE-2
106	0.88	2.7	0.0	18.41	1.001	0.991
106R	0.88	2.7	0.0	18.55	1.002	0.996
107	73.95	254.09	0.0	21.34	0.997	0.983
109	47.50	163.06	0.0	20.01	1.001	0.986
110	22.63	77.84	0.0	18.90	1.001	0.986
110R	22.63	77.84	0.0	19.03	0.999	0.986
111	103.70	363.98	0.0	23.87	1.000	0.976
112	103.18	360.62	0.49	30.28	0.999	0.980
113	102.23	359.69	0.98	38.78	1.000	0.979
114	102.65	359.59	1.47	51.06	0.996	0.976
115	102.68	359.55	1.97	73.08	0.998	0.975
116	103.61	362.45	2.16	90.27	0.997	0.982
117 ^b	83.30	286.57	0.0	27.42	1.000	0.989

^aKENO statistics $\pm\sigma < 0.003$.

^bFuel pins were removed in this experiment.

表 4.2.2 解析手法の評価（棒状+溶液：非均質燃料系）

データソース	ケース 数	コード	平均値 k_{av}	標準偏差 σ	$n^{*a)}$	未臨界限度 $k_{ei}^{*b)}$	最小値 k_{min}
日米共同 臨界実験	13	SCALE4	0.999	0.002	3.4	0.992	0.996
		SCALE2	0.983	0.006	3.4	0.962	0.975

*a) 臨界実験の解析結果（頻度分布）が正規分布であると仮定したとき、その標本数、平均値及び標準偏差から、ある一定の臨界超過確率（危険率）と信頼度で未臨界限度を推定するための係数。ここでは、臨界超過確率を2.5%、信頼度を97.5%として定めている。

*b) $k_{ei} = k_{av} + n\sigma$.

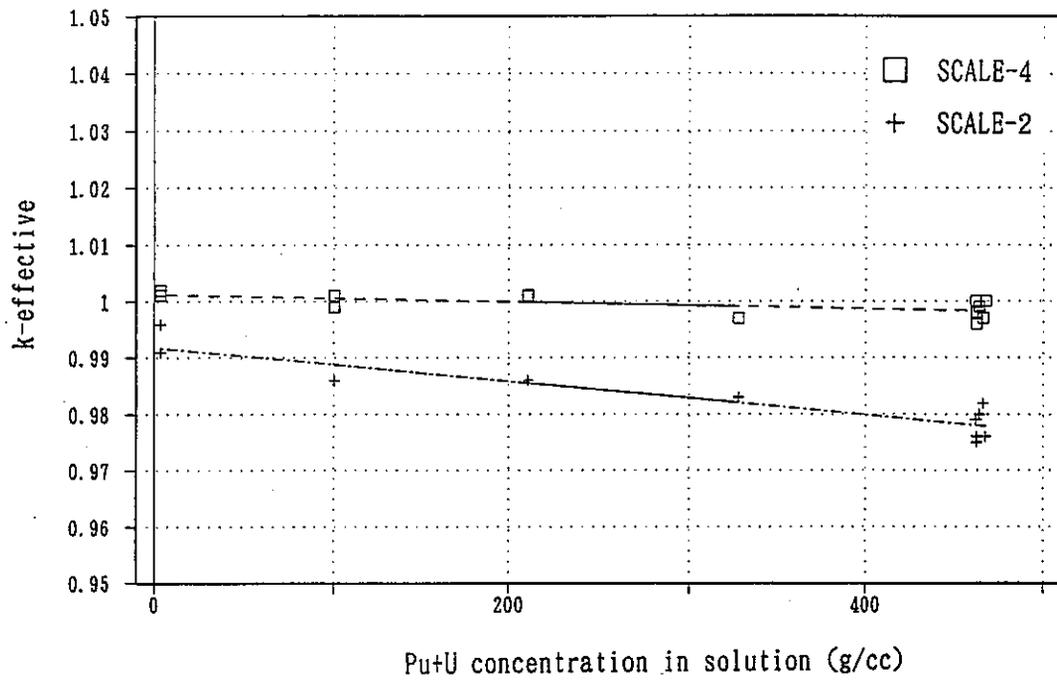


図4.2.1 棒状+溶液/非均質燃料系の解析結果 (燃料濃度依存性)

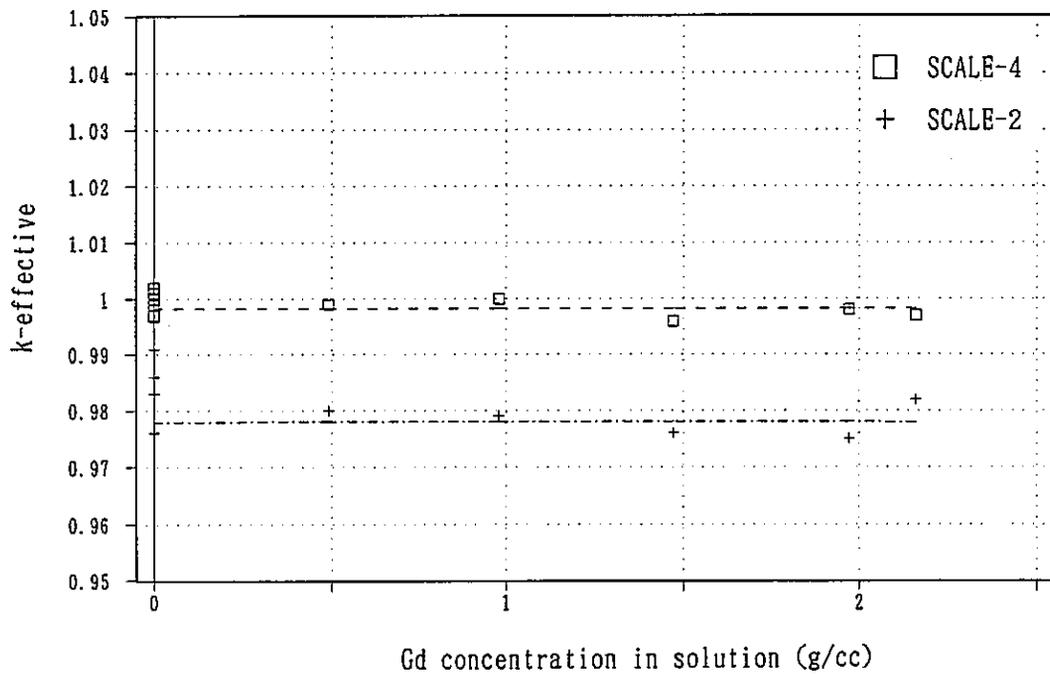


図4.2.2 棒状+溶液/非均質燃料系の解析結果 (Gd濃度依存性)

4.3 棒状燃料と有機溶媒の体系の解析⁴⁾

この実験は、日米共同臨界実験の中で最初に実施したもので、ORNLはその当時のSCALEコードシステムの最新版であるSCALE-3.1を使用し、動燃事業団は他の実験と同様にSCALE-2を使って解析した。

非均質格子系の解析を行う場合、燃料ピンの格子をまず格子計算で均質化してから体系全体の臨界計算を実施する方法と、体系全体の臨界計算の中で直接燃料ピンをモデル化する方法とがあるが、SCALE-3.1では、その両方の方法で解析し、またSCALE-2では、前者の方法で解析した。

後者の方法は、臨界実験の解析すなわち検証作業には便利であるが、実際の臨界安全設計・評価のためのペレット直径や格子ピッチをパラメータとした解析には、前者の方がモデル化が容易である。。

解析結果を表4.3.1及び図4.3.1に示す。均質化の有無、あるいはSCALE-2か-3.1にかかわらず、いずれも実験値($k_{eff}=1.0$)と良い一致を示している。

また、水を減速材としたときの解析結果との比較を図4.3.2に示している。解析結果は、減速材の種類によらずほぼ同様な傾向を示している。

以上より、SCALEコードシステムに用意されているH、O、Cの断面積（ここでは、27群断面積を使用）は、有機溶媒を減速材とする場合にそのまま使用しても問題ないと考えられる。

なお、本実験体系には、前節（4.3節）と違って、減速材である有機溶媒の中に燃料は含まれていない。またSCALEコードシステムでは、第2版から第4版までの改訂に際して断面積そのものの変更が行われていない。従って、本実験体系をSCALE-4で解析したとしても、4.1節の場合と同様に、ここで使用した第2版(SCALE-2)、及び第3版(SCALE-3.1)と同等の結果を出すものと考えられる。

表4.3.1 有機溶媒減速棒状燃料系の解析結果

Pitch (cm)	Water Moderator			Organic Moderator		
	Experiment number	K -effective ^a		Experiment number	K -effective ^a	
		SCALE-3.1+ (ORNL)	SCALE-2 (PNC)		SCALE-3.1+ (ORNL)	SCALE-2 (PNC)
0.761	067		0.99543 (0.00251)	065		1.00015 (0.00248)
0.767	003R		1.00301 (0.00245)			
0.968	021	1.00689 (0.00258)	1.00012 (0.00278)	063	1.00147 (0.00270)	1.00350 (0.00266)
1.242	043	1.00332 (0.00277)	1.00149 (0.00274)	062	1.00725 (0.00272)	1.00398 (0.00275)
1.537	013	1.00505 (0.00274)	1.00889 (0.00268)	061	1.00680 (0.00279)	1.00765 (0.00225)
1.935	032	1.00316 (0.00253)	1.01397 (0.00247)	060	1.00038 (0.00271)	1.00704 (0.00229)

^aOne standard deviation given in parentheses.

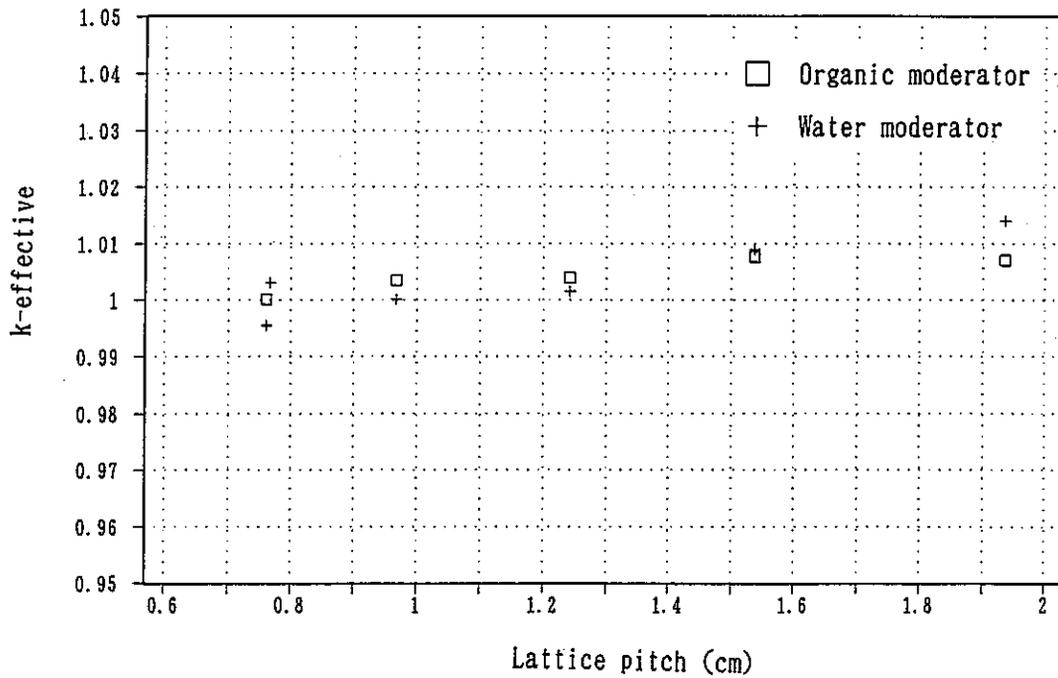


図4.3.1 有機溶媒減速棒状燃料系の解析結果(SCALE-2)

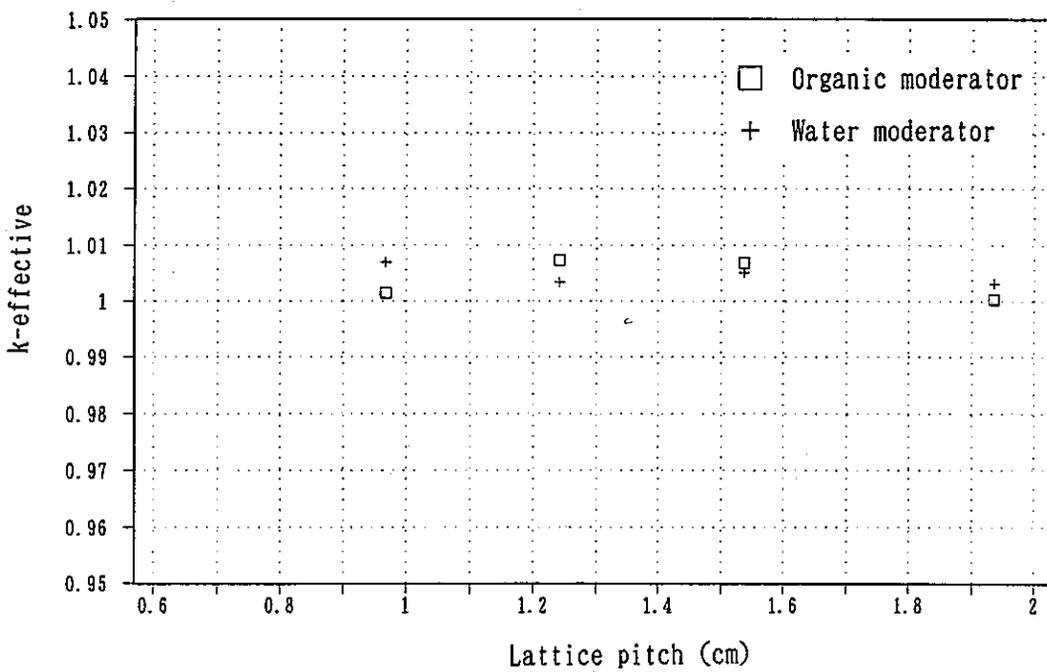


図4.3.2 有機溶媒減速棒状燃料系の解析結果(SCALE-3.1)

4.4 溶液燃料の密度式の検討

溶液状燃料を含む体系を計算コードによって解析するには、溶液状燃料に含まれる水素原子の個数密度を求める必要がある。水素原子は大きな中性子減速効果を有するので、その個数密度は計算結果に大きな影響を与える。

燃料溶液中の水素原子の個数密度を求めるには、単位体積の燃料溶液に含まれる水の重量が必要である。しかし、媒質である水そのものの重量を直接測定することはできないので、臨界実験では、使用した燃料溶液について単位体積の溶液の重量（即ち、溶液の密度）を測定しておく。それは、燃料溶液の密度から溶液中の溶質（燃料及び遊離硝酸）の重量（即ち溶質の濃度）を差し引けば水の重量が求まるからである。

日米共同臨界実験では、第3章の各節で示した実験結果（表）から分かるように、溶液状燃料を含むすべての実験で、実験ごとに燃料溶液の密度を、各溶質の濃度とともに測定している。

一方、設計或は評価の段階における解析計算では、個別に実測値があるわけではないので、あらかじめ実測値に基づいて作成された溶液燃料の密度式を使って単位体積の溶液に含まれる水の重量を求めることになる。

プルトニウムとウランの混合溶液系の燃料に対して、これまでにいくつかの密度式が提案されており、それぞれの密度式は、その導出に使用された密度データの範囲内では、使用した実測値の信頼性に応じた高い信頼性が確保されていた。

しかし、プルトニウムとウランの混合溶液系のデータそのものが少なかったので、適用可能な範囲には自ずから限度があった。

日米共同臨界実験で得られた溶液密度の測定値（67ケース、そのうちの5ケースはGdを含む）により、プルトニウムとウランの混合溶液系について、溶液密度の実測値のある溶質濃度の範囲が大幅に拡大したので、それらを使って、プルトニウムとウランの混合溶液系用として提案されている下記の溶液密度式の適用性の検討を行った。

- ・HB式（1988年発行の臨界安全ハンドブックに記載の式）
- ・SST式（JAERI-M 88-127）

既存の溶液密度式による溶液密度の計算値を、日米共同臨界実験の実測値と直接比較して図4.4.1に示す。また、実測値と計算値の差を拡大して図4.4.2、図4.4.3に示す。いずれの密度式でも実測値との差は解析結果に影響するほど大きくはなく、日米共同臨界実験で得られた溶質濃度の範囲に対しても、既存の溶液密度式が適用可能であることがわかる。

ただし、燃料溶液の密度式が、実測値に基づいて設定されたもの（即ち、回帰式）であることを考えると、信頼性のある新たなデータが多数追加された場合には、大きな差がないとしても、密度式そのものの改訂をしておくべきであろう。

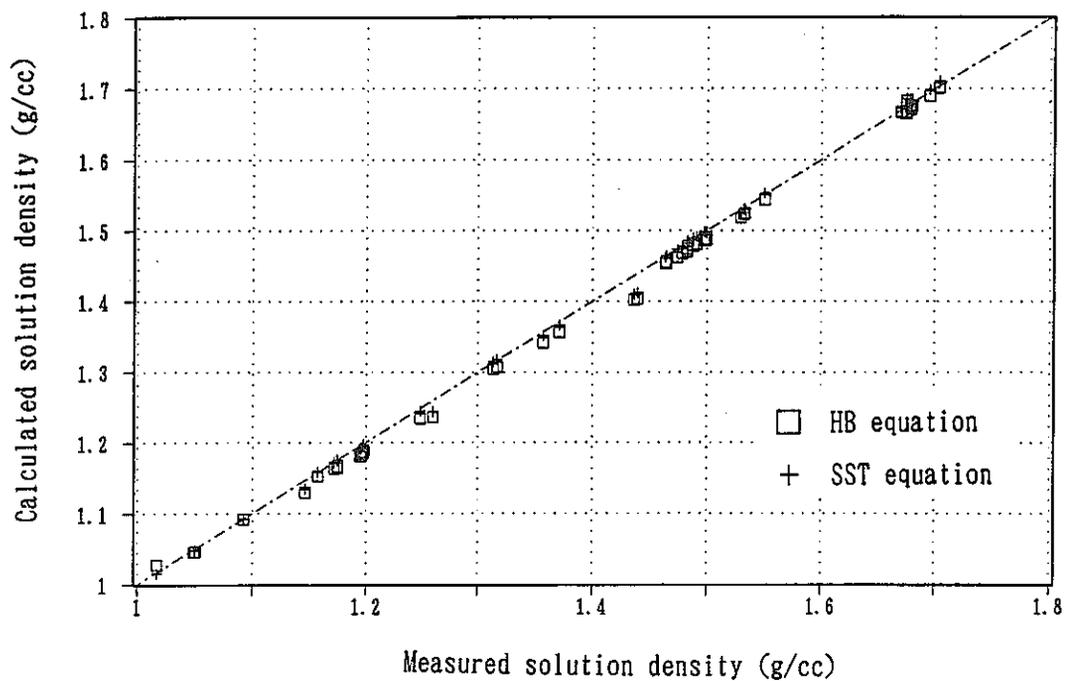


図4.4.1 溶液密度の計算値と実測値

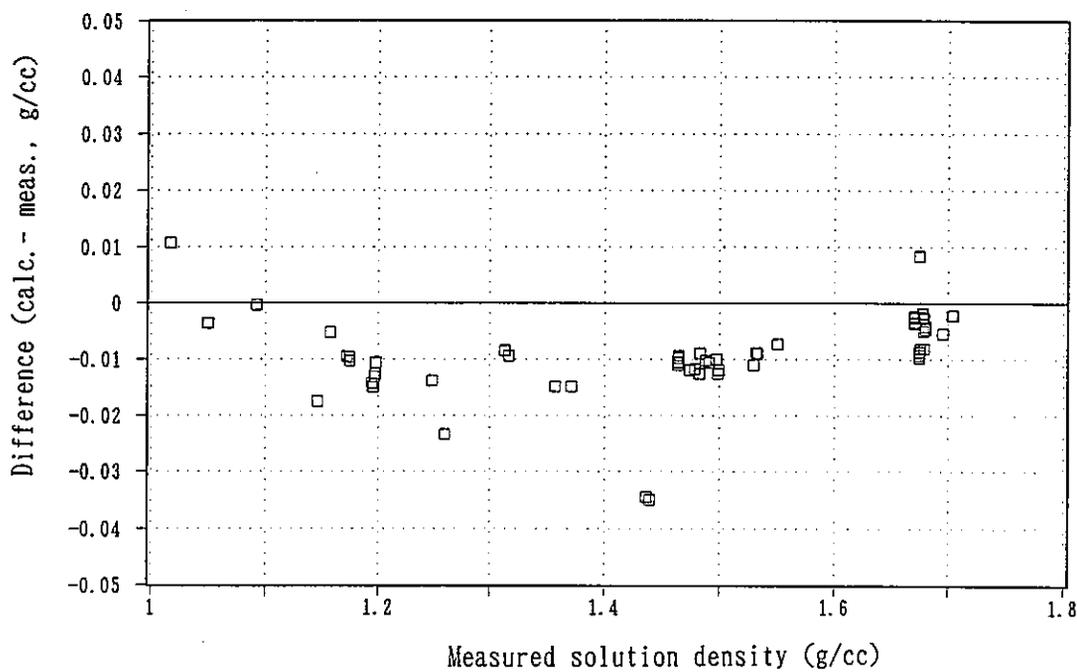


図4.4.2 溶液密度式による計算値と実測値の差 (HB式)

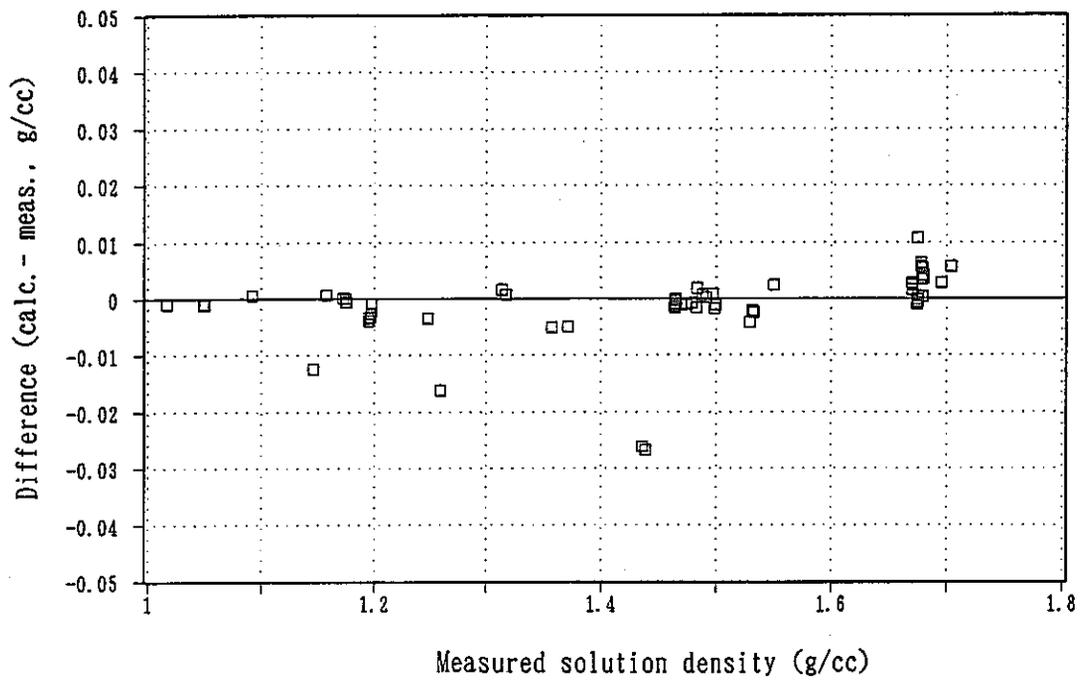


図4.4.3 溶液密度式による計算値と実測値の差 (SST式)

5. ま と め

- (1) 日米共同臨界実験により、臨界安全解析手法の検証用として高い品質を維持した、77ケースの貴重な臨界実験データが得られた。

「均質溶液燃料」の体系では、炉心形状、Pu富化度、Pu及びU濃度、中性子吸収材、中性子反射材等をパラメータとしており、また、「棒状燃料と溶液燃料」からなる体系では、燃料溶液中の燃料濃度及びガドリニウム濃度をパラメータとしている。また、「棒状燃料と有機溶媒」からなる体系では、有機溶媒として約30vol%のTBPを含む直鎖飽和炭化水素（ドデカン等）を使用している。

- (2) 日米共同臨界実験で得られた臨界実験データを解析するにより、SCALEコードシステム（主としてSCALE-2とSCALE-4）の検証を行い、同コードシステムが高い信頼性を有することを確認した。

「均質溶液燃料」の体系、及び「棒状燃料と有機溶媒」の体系では、SCALE-2とSCALE-4とによる検証結果に有意な差はなく、共に高い信頼性を示した。

また、「棒状燃料と溶液燃料」からなる体系では、SCALE-4が減速材領域の燃料濃度及びガドリニウム濃度に関係なく高い信頼性を示したのに対し、SCALE-2では減速材領域の燃料濃度に依存した誤差が発生した。

従って、減速材領域に燃料を含む特殊な体系に限っては、SCALE-4の使用が適切であると考えられる。ただし、減速材が燃料を含まない純水の場合には、既存実験による検証⁵⁾で既に明らかのように、SCALE-2も高い信頼性を示しており、特に問題はない。

- (3) 日米共同臨界実験では、実験データの一つとして、67ケースの均質溶液燃料について「溶液密度データ」を取得している。プルトニウムとウランを同時に含む硝酸水溶液系の溶液密度データが少なかったため、同データは、均質Pu+U燃料溶液に係わる「溶液密度式」について、その信頼性を確認するためのデータとして役立った。

また、密度式を改訂する際には、回帰式を求めるための貴重なデータとしても役立つものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) G. R. Smolen(ORNL), R. C. Lloyd(PNL), and H. Funabashi(PNC, Japan), "Criticality Data and Validation Studies of Pu-U Nitrate Solution in Cylindrical and Slab Geometry," Nuclear Technology, (to be published).
- 2) G. R. Smolen(ORNL), R. C. Lloyd(PNL), and T. Koyama(PNC, Japan), " Criticality Data and Validation Studies of Pu-U Nitrate Solutions in Annular Geometry," Nuclear Technology, (to be published).
- 3) G. R. Smolen(ORNL), R. C. Lloyd(PNL), and T. Matsumoto(PNC, Japan), "Criticality Data and Validation Studies of Mixed Oxide Fuel Pin Arrays in Pu-U-Gd Nitrate," Nuclear Technology, (to be published).
- 4) G. R. Smolen(ORNL), S. R. Bierman(PNL), and N. Fukumura(PNC, Japan), "Criticality Data and Validation Studies of Arrays of Mixed Oxide Fuel Pins in Aqueous and Organic Solutions," Nuclear Technology, (to be published).
- 5) J. T. Mihalczo, E. D. Blakeman, G. E. Ragan, and E. B. Jonson(ORNL), and Y. Hachiya (PNC, Japan), "Dynamic Subcriticality Measurements Using the ^{252}Cf -Source-Driven Noise Analysis Method," Nuclear Science and Engineering 104, 314-338(1990).
- 6) J. T. Mihalczo, E. D. Blakeman, G. E. Ragan, and R. C. Kryter(ORNL), H. Seino(PNC, Japan), and R. C. Robinson(UT), " ^{252}Cf -Source-Driven Noise Measurements of Subcriticality for a Slab Tank of Aqueous Pu-U Nitrate," Nuclear Science and Engineering, 107, 35-57 (1991).
- 7) J. T. Mihalczo, E. D. Blakeman, G. E. Ragan, and R. C. Kryter(ORNL), H. Seino(PNC, Japan), and R. C. Robinson(Y-12), " ^{252}Cf -Source-Driven Neutron Noise Measurements of Subcriticality for an Annular Tank Containing Aqueous Pu-U Nitrate," Nuclear Technology, 94, 336-360 (1991).

- 8) Y. Kishimoto, T. Matsumoto, et. al., "Verification of Criticality Module in SCALE System for the Fast Breeder Fuel Cycle," Proceedings of ISCS' 87 p219-225, International Seminar on Nuclear Criticality Safety, Tokyo, Japan, Oct. 19-23, 1987.
- 9) "SCALE-2: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation," NUREG/CR-0200 (ORNL/NUREG/CSD-2) as revised June 1983.
- 10) "SCALE-3: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation," NUREG/CR-0200 Rev. 3 (ORNL/NUREG/CSD-2/R3), Dec. 1984.
- 11) "SCALE-4: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation," NUREG/CR-0200 Rev. 4 (ORNL/NUREG/CSD-2/R4), Jan. 1990.

付録－1 実験施設及び実験装置の写真集

- 写真－A 臨界実験施設の外観
- 写真－B 臨界実験施設の内部（制御室）
- 写真－C1 均質溶液燃料系の臨界実験装置（平板槽）
（水反射体用パネルを外した状態）
- 写真－C2 均質溶液燃料系の臨界実験装置（円筒槽）
（大／小口径の2基を水反射体タンク内に設置した状態）
- 写真－C3 均質溶液燃料系の臨界実験装置
（円筒槽用のコンクリート反射体）
- 写真－C4 均質溶液燃料系の臨界実験装置
（円環槽、燃料ボトル、及びスパーサ）
- 写真－C5 均質溶液燃料系の臨界実験装置
（円環槽と燃料ボトルの間に挿入する中性子吸収材）
- 写真－D 棒状＋溶液／非均質燃料系の臨界実験装置
（ボイラチューブ型の槽）
- 写真－E 有機溶媒減速棒状燃料系の臨界実験装置
（大型水タンク及び燃料棒を装荷した円筒タンク）

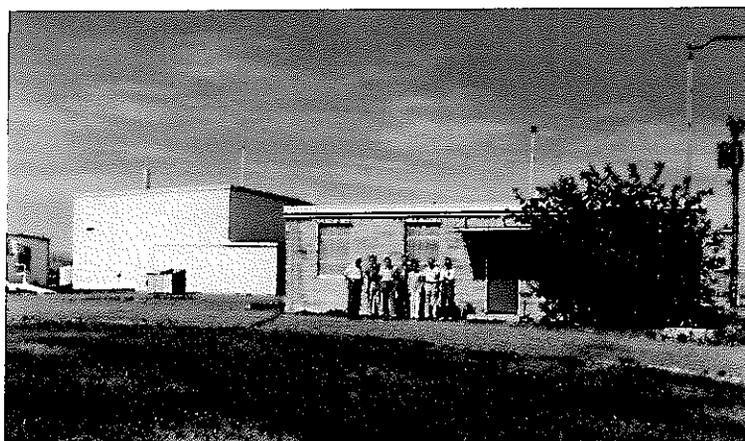
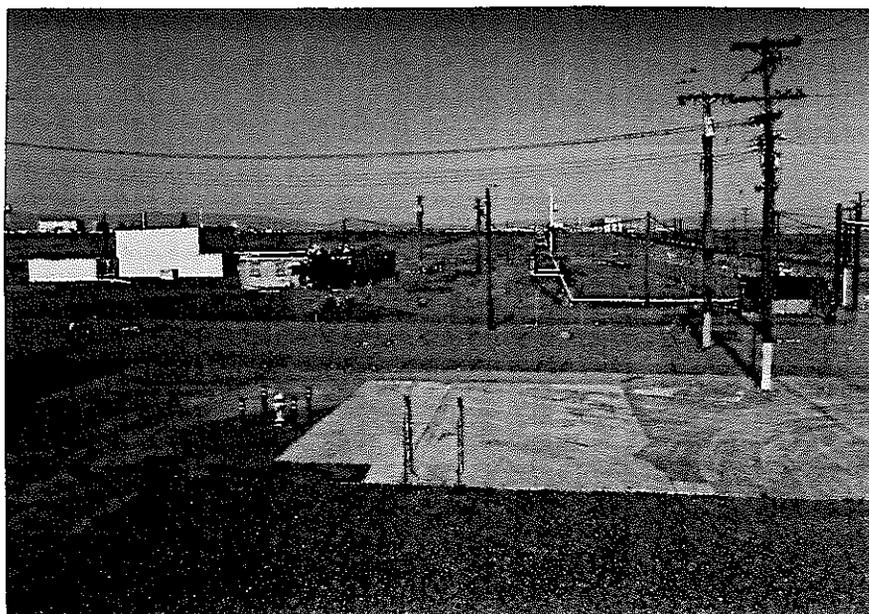


写真-A 臨界実験施設の外觀

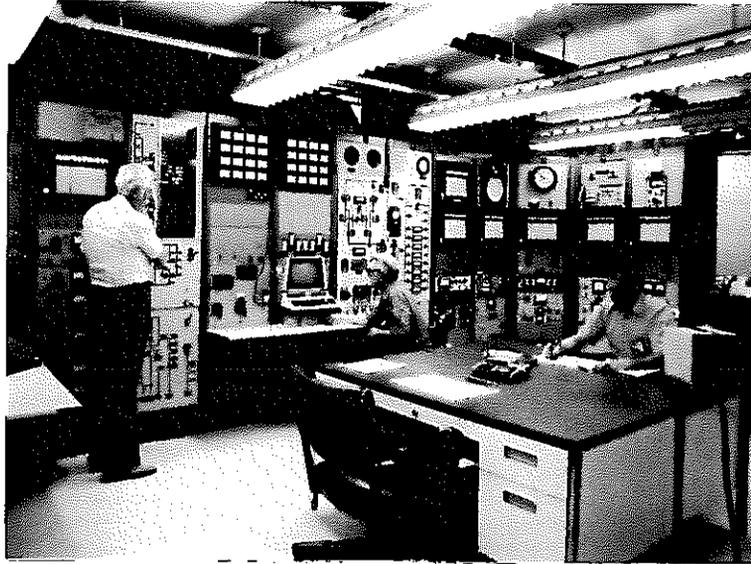


写真-B 臨界実験施設の内部（制御室）

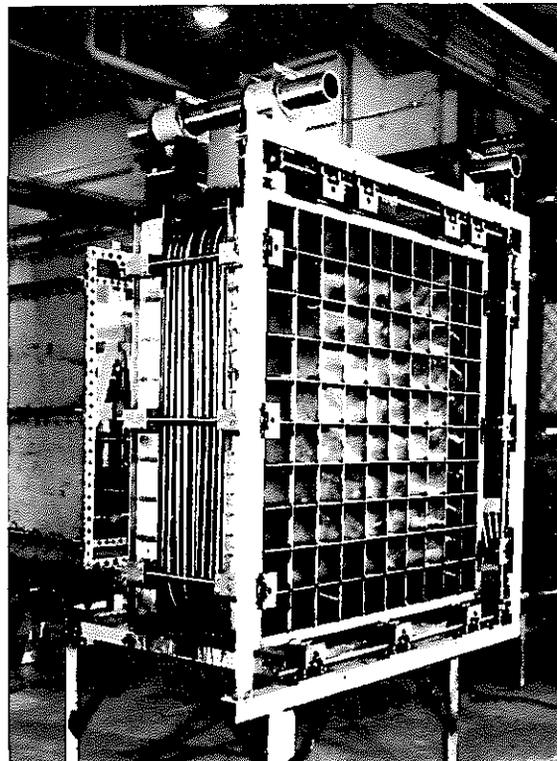


写真-C1 均質溶液燃料系の臨界実験装置（平板槽）
（水反射体用パネルを外した状態）

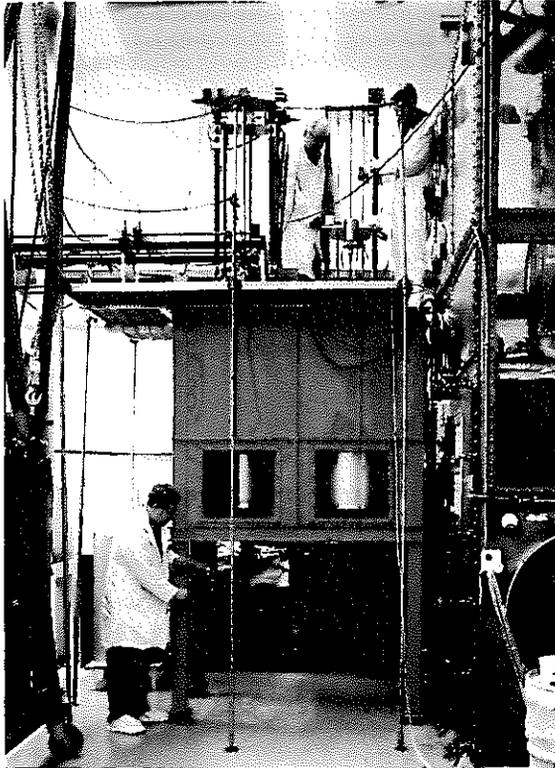


写真-C2 均質溶液燃料系の臨界実験装置（円筒槽）
（大／小口径の2基を水反射体タンク内に設置した状態）

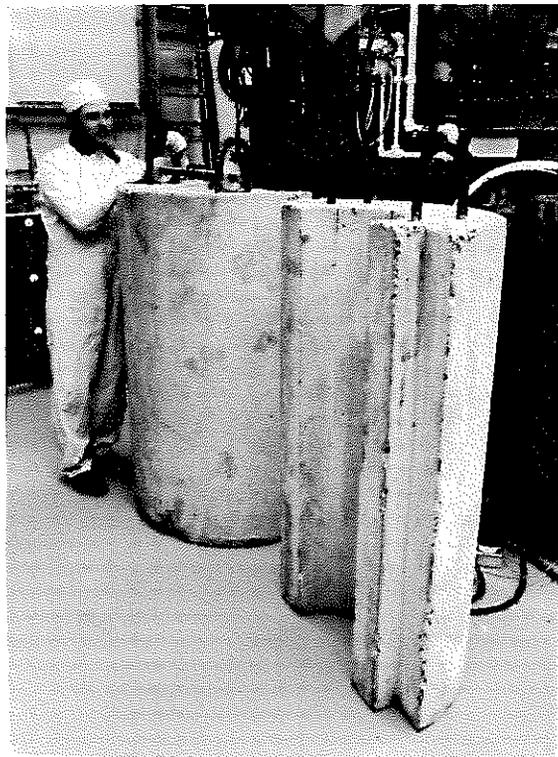


写真-C3 均質溶液燃料系の臨界実験装置
（円筒槽用のコンクリート反射体）

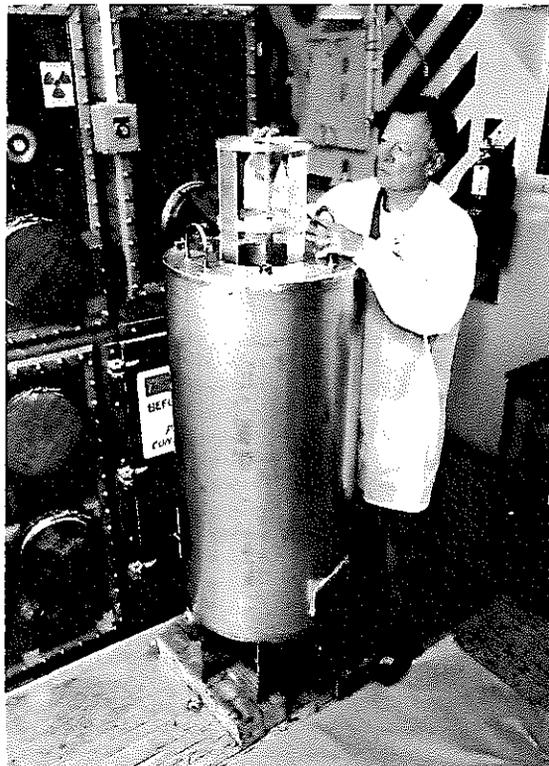


写真-C4 均質溶液燃料系の臨界実験装置
(円環槽、燃料ボトル、及びスパーサ)

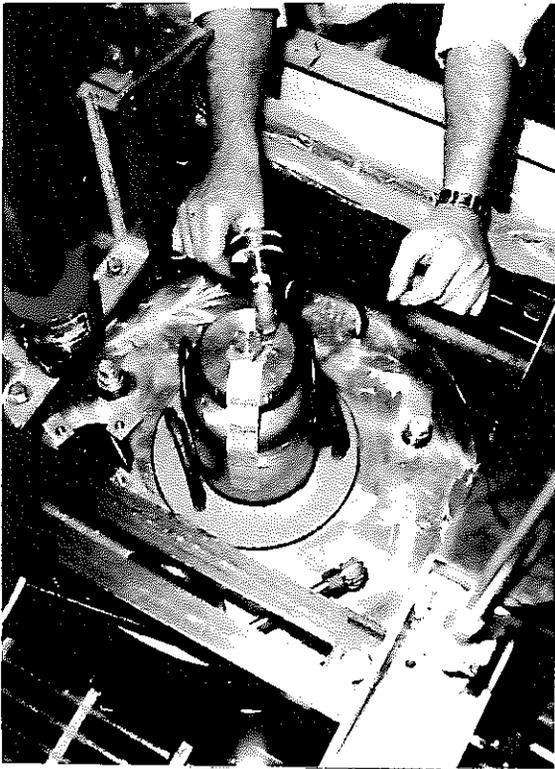
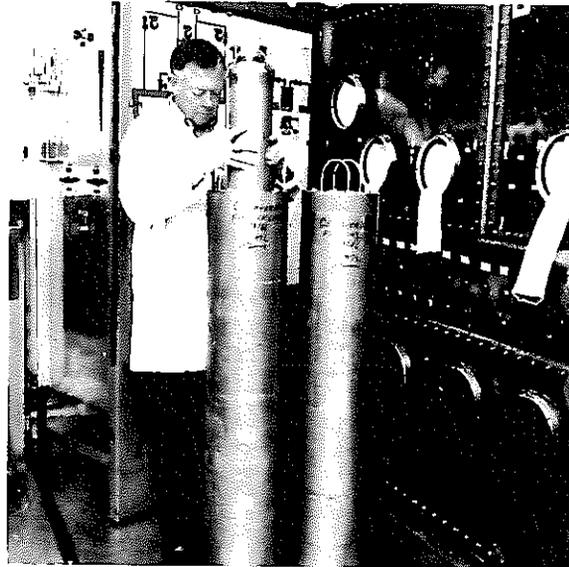
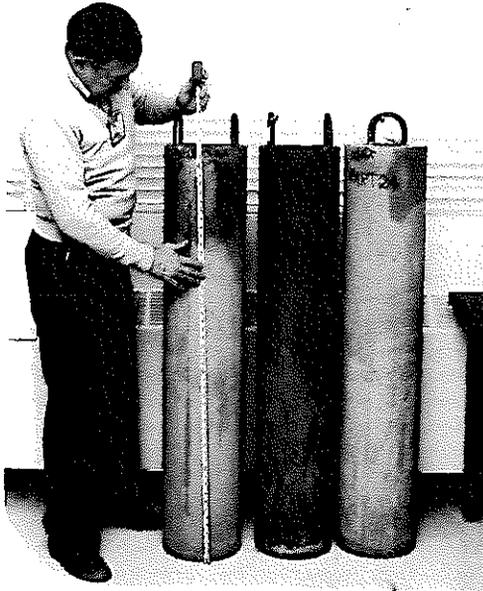


写真-C5 均質溶液燃料系の臨界実験装置
(円環槽と燃料ボトルの間に挿入する中性子吸収材)

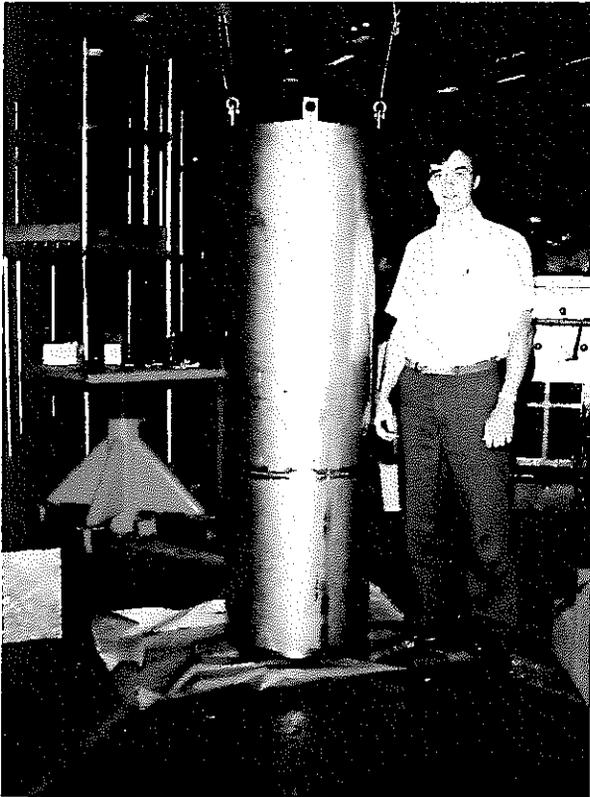
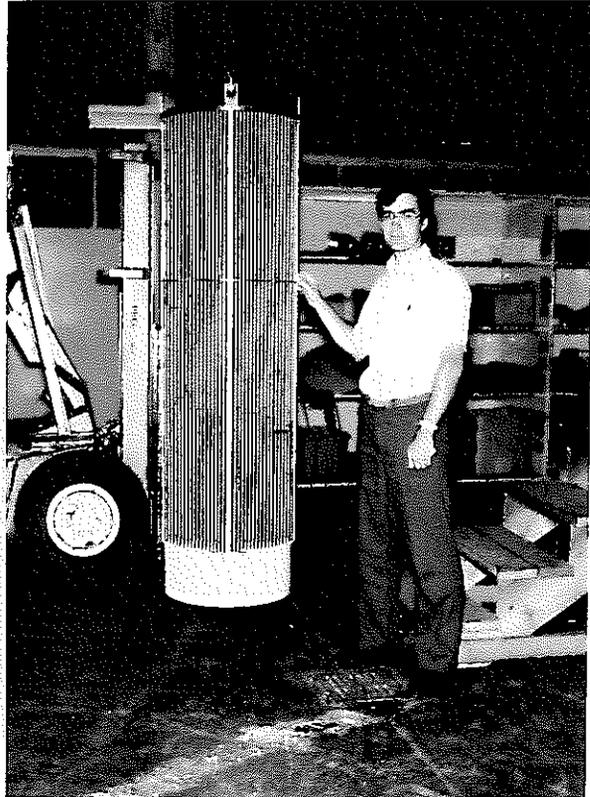
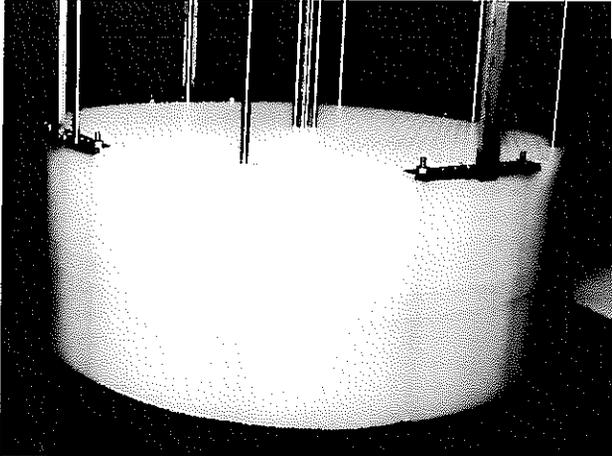


写真-D 棒状+溶液/非均質燃料系の臨界実験装置
(ボイラチューブ型の槽)

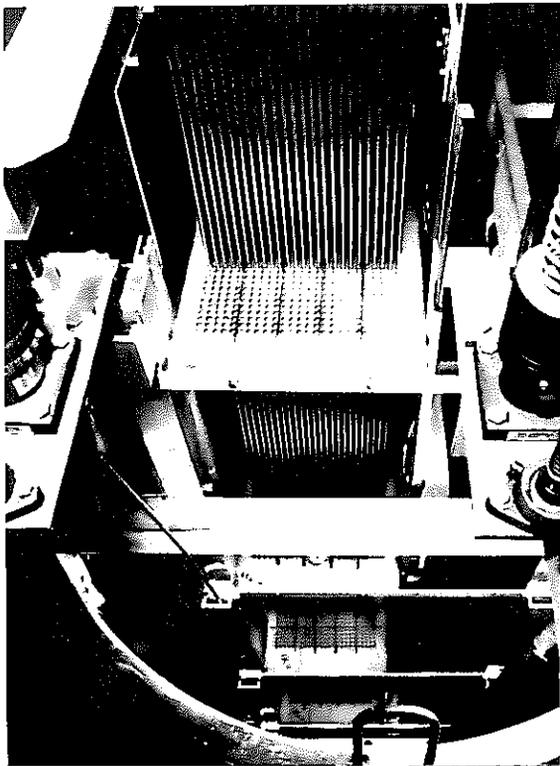
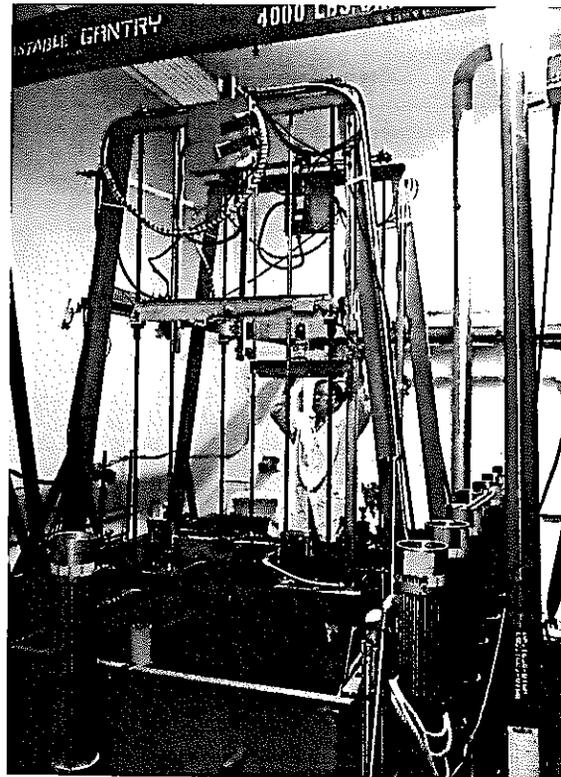
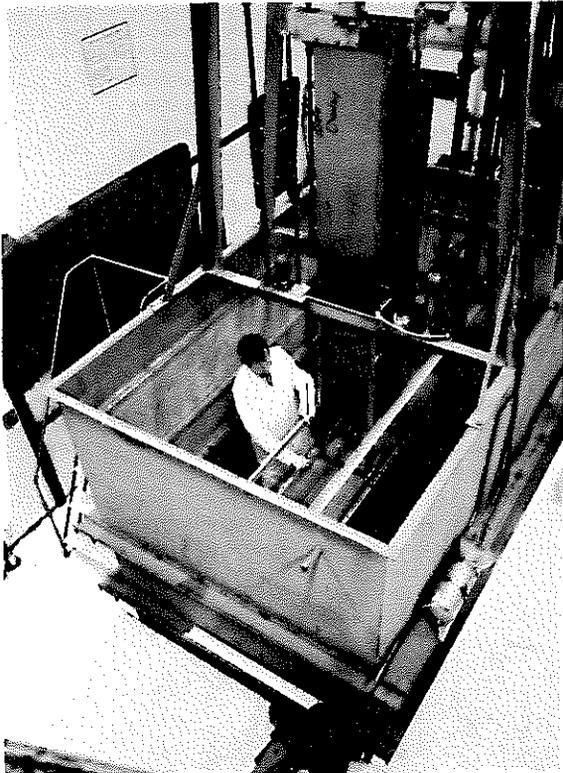


写真-E 有機溶媒減速棒状燃料系の臨界実験装置
(大型水タンク及び燃料棒を装荷した円筒タンク)