JAEA-Data/Code
2011-021

次世代再処理施設の設計検討に供する臨界安全制限寸法等のデータ

Subcritical Dimensions for Design Study of Future Reprocessing Facility

須藤 俊幸　福島 学
Toshiyuki SUTO and Manabu FUKUSHIMA

次世代原子力システム研究開発部門
再処理設計・技術実証ユニット
Reprocessing Plant Design & Development Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

February 2012
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Data/Code

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

JAEA-Data/Code 2011-021

次世代再処理施設の設計検討に供する臨界安全制限寸法等のデータ

日本原子力研究開発機構　次世代原子力システム研究開発部門
再処理設計・技術実証ユニット
須藤　俊幸、福島　学[*1]

（2011 年 12 月 12 日受理）

将来の再処理施設を考える場合には、軽水炉ウラン燃料のみならず、軽水炉 MOX 燃料、さらには高速炉燃料も取り扱う可能性も考えられ、様々なプルトニウム富化度、プルトニウム同位体組成をもつ使用済燃料の再処理に対し、合理的な臨界安全管理・設計を検討していく必要がある。

既存の臨界安全ハンドブック等では、プルトニウムの多様な組成に対する十分なデータが記載されておらず、また、中性子吸収材を使用した場合のデータや、円環槽に関するデータはほとんどなく、過度に保守的となるデータを使用するか、個別に臨界計算する必要があった。

本検討では、将来の再処理施設の機器の臨界安全設計検討に活用することを念頭に、複数のプルトニウム富化度、プルトニウム同位体組成に対し、無限円筒、無限平板、有限円環槽を対象に、硝酸ウラン、プルトニウム混合溶液に対する keff（+3 σ）≦0.95 を満たす制限寸法を計算し、グラフ、表にまとめた。

また、得られた結果より、臨界安全管理方法の選定において配慮すべき事項についてまとめた。

なお、本検討で用いた計算コード／核データライブラリによる計算精度の検証は行っていない。得られたデータの設計検討レベルを超える正規の採用に当たっては、精度の確認が必要である。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194　茨城県那珂郡東海村村松 4-33
*1 ㈱NESI

JAEA-Data/Code 2011-021

Subcritical Dimensions for Design Study of Future Reprocessing Facility

Toshiyuki SUTO and Manabu FUKUSHIMA[*1]

Reprocessing Plant Design & Development Unit
Advanced Nuclear System Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

（Received December 12, 2011）

Future reprocessing facilities are considered to treat not only LWR uranium fuels but also LWR-MOX fuels and even FBR fuels. These spent fuels have various enrichments and isotopic compositions of plutonium. In order to make reasonable criticality safety design and management of such multi-fuel reprocessing facilities, there are needs of critiricality safety data with a multiple of enrichments and isotopic compositions of plutonium.

However existing "criticality safety handbooks" don't have enough data for a variety of plutonium contents. Furthermore, they have limited data regarding to the system including neutron absorbers and annular vessel. So that, it is often required to use overly conservative data or carry out criticality calculations for each case.

In this study, the authors evaluated subcritical dimensions of uranium/plutonium mixed nitrate solution with a multiple set of enrichments and isotopic compositions of plutonium for cylinder, slab, and annular geometries and arranged the results in tables and graphs which are usable for the criticality safe design study of future reprocessing facilities. In addition, some findings useful for selecting criticality safety control methods were summarized.

Keywords : Subcritical Dimensions, Reprocessing, Plutonium Enrichment, Isotopic Composition,

---

*1 NESI Corporation

目 次

1. はじめに 1
2. 既存データの整理 1
3. 機器の制限寸法等の検討条件 4
3.1 計算コード及び核データライブラリ 4
3.2 燃料組成条件 4
3.2.1 U 濃縮度 4
3.2.2 Pu 同位体組成（パラメータ） 4
3.2.3 Pu 富化度 (Pu/(Pu+U)重量比) 5
3.2.4 溶液密度 5
3.3 その他の条件 5
4. 計算データ 7
4.1 無限体系 7
4.1.1 Pu 濃度－k_∞関係 7
4.1.2 U（濃縮度1.6%）、Pu 濃度－k_∞関係 8
4.1.3 パラメータとする Pu 同位体組成の絞り込み 9
4.1.4 Pu 濃度－必要 Gd 濃度関係 9
4.2 有限体系 11
4.2.1 無限円筒直径 11
4.2.2 円環槽液厚 31
4.2.3 無限平板槽液厚 67
5. まとめ 87
5.1 本検討の特徴 87
5.2 制限寸法の適用条件 87
5.3 得られた主要な知見 88
5.3.1 一般事項 88
5.3.2 臨界安全管理方法の選定の際の配慮事項 89
参考文献 91

Contents

1. Introduction ····· 1
2. Existing Data ····· 1
3. Calculational Conditions ····· 4
3.1 Calculational code and nuclear data library ····· 4
3.2 Fuel Composition ····· 4
3.2.1 U enrichment ····· 4
3.2.2 Pu isotopic composition ····· 4
3.2.3 Pu enrichment (Pu/(Pu+U) weight raitio) ····· 5
3.2.4 Solution density ····· 5
3.3 Other conditions ····· 5
4. Calculated Data ····· **7**
4.1 Infinite System ····· 7
4.1.1 Pu concentration－k_∞ relation ····· 7
4.1.2 U（1.6% enrichment）, Pu concentration－k_∞ relation ····· 8
4.1.3 Selection of Pu isotopic compositions ····· 9
4.1.4 Pu concentration－necessary Gd concentration relation ····· 9
4.2 Finite System ····· 11
4.2.1 Cylinder radius ····· 11
4.2.2 Annular cylinder thickness ····· 31
4.2.3 Slab thickness ····· 67
5. Summary ····· 87
5.1 Features of this study ····· 87
5.2 Applicable condition of subcritical dimensions ····· 87
5.3 Major findings ····· 88
5.3.1 General findings ····· 88
5.3.2 Specific findings regarding selection of criticality control methods ····· 89
Reference ····· 91

1. はじめに

将来の再処理施設を考える場合には、軽水炉ウラン（U）燃料のみならず、軽水炉 MOX 燃料、さらには高速炉燃料も取り扱う可能性も考えられ、様々なプルトニウム（Pu）富化度、Pu 同位体組成をもつ使用済燃料の再処理に対し、合理的な臨界安全管理・設計を検討していく必要がある。

既存の臨界安全ハンドブック等では、Pu の多様な組成に対して十分なデータが記載されておらず、また、中性子吸収材を使用した場合のデータや、円環槽に関するデータはほとんどなく、過度に保守的となるデータを使用するか、個別に臨界計算する必要があった。

本検討では、将来の再処理施設の機器の臨界安全設計検討に活用すべく、複数の Pu 富化度、Pu 同位体組成に対し、無限円筒、無限平板、有限円環槽を対象に、硝酸 U、Pu 混合溶液に対する keff（+3 σ）≦0.95 を満たす制限寸法を計算し、グラフ、表にまとめた。

また、得られた結果より、臨界安全管理方法の選定において配慮すべき事項についてまとめた。

なお、図表番号は項立てとの対応を明確にするために、各項毎に項番号の後にハイフン（-）を付けて連番を付した。

2. 既存データの整理

現在使用されている種々の臨界安全ハンドブックに記載されている硝酸溶液系の臨界データから、参考となりうる均質水溶液系のデータを表 2-1 に示す。$Pu(NO_3)_4$ 水溶液系、$UO_2(NO_3)_2$-$Pu(NO_3)_4$ 水溶液系ともいくつかのデータはあるが、Pu 同位体組成の fissile 割合の高いものが多く、最近検討されているような fissile 割合が 80%以下のものはほとんどない。また、共存する U は天然 U に限られる。さらに、円環槽、中性子吸収材を使用したものデータはほとんど存在しない。

表 2-1　国内外の臨界安全ハンドブックにある硝酸 Pu 含有水溶液の臨界データ

(1) $Pu(NO_3)_4$ 水溶液系

出典	記載項目	Pu 同位体組成 （Pu239:Pu240:Pu241）
臨界安全ﾊﾝﾄﾞﾌﾞｯｸ[1)] (1988)	K_∞-Pu 濃度	Pu239 100～1%
	円柱直径 平板厚さ	100: 0: 0、80:20:0 95: 5: 0、70:30:0 90:10:0
臨界安全ﾊﾝﾄﾞﾌﾞｯｸ・ﾃﾞｰﾀ集第 2 版[2)] (2009)	K_∞-Pu 濃度	Pu239 100、95、90、80%
	円柱直径 平板厚さ	100:0: 0、71:17:12 80:10:10
GRS（ドイツ）[3)] (1985)	k_∞-Pu 濃度	Pu240 0、5、10、15、20% 90: 5 :5、85:10:5 59：25：12：4
	円柱直径 平板厚さ	100: 0:0、 95: 5 :0 85:10:5、59：25：12：4
	keff-円筒直径-Pu 濃度 3mmSUS、30cm 水反射	100:0 :0
	keff-平板厚さ-Pu 濃度 6mmSUS、30cm 水反射 6mmSUS、30cm コンクリート反射 6mmSUS、0.5mmCd、30cm、水反射 6mmSUS、0.5mmCd、30cm コンクリート反射	100:0 :0
	平板厚さ-Pu 濃度 30cm 水、30cm コンクリート反射	85:10:5
	平板厚さ-Pu 濃度 6mmSUS、30cm コンクリート反射	90: 5: 5 85:10:5
ARH-600 [4)] (1968)	k_∞-Pu 濃度 円柱直径 平板厚さ	100: 0: 0、 90:10: 0 97: 3: 0、 85:15: 0 95: 5: 0、 80:20: 0

(2) $UO_2(NO_3)_2$-$Pu(NO_3)_4$ 水溶液系

(a) 臨界安全ハンドブック [1)]

円柱直径 Pu 富化度、U 濃縮度	平板厚さ Pu 富化度、U 濃縮度	Pu 同位体組成 Pu239:Pu240:Pu241
Pu 30wt%、NU*		90：10： 0
Pu 10、30、50wt%、NU	Pu 10、30、50wt%、NU	80：10：10
Pu 0.744wt%、NU	Pu 0.744wt%、2%EU	80：15： 5
Pu 30wt%、NU		60：25：15

* NU:天然ウラン

(b) 臨界安全ハンドブック・データ集第 2 版 [2)]

(i) k_∞-H/(U+Pu)

Pu 同位体組成 ^{239}Pu 100%、U 同位体組成 ^{235}U 0.711wt%

Pu 富化度 0.2～100wt%

(ii) 推定臨界値、推定臨界下限値

円柱直径、平板厚さ Pu 富化度、U 濃縮度	Pu 同位体組成 Pu239:Pu240:Pu241
Pu 0.744wt%、U 2、3.5% Pu 10、30、50wt%、 NU*	71:17:12
Pu 10、30、50wt%、 NU	80:10:10

* NU:天然ウラン

(c) GRS（ドイツ）[3)]

30％$Pu(NO_3)_4$-70％$UO_2(NO_3)_2$
・k_∞-(U+Pu)濃度
・円柱直径-(U+Pu)濃度、平板厚さ-(U+Pu)濃度
Pu 同位体組成 ^{239}Pu 100%、U は天然 U

(d) ARH-600(米国) [4)]

Pu 同位体組成 ^{239}Pu 100%、U 同位体組成 ^{235}U 0.711 wt%
・（k_∞=1.00、0.98）-Pu 富化度-(NU+Pu239)濃度
・円柱直径-(NU+Pu239)濃度、Pu 富化度 2、4、6、8、15、30 wt%
・平板厚さ-(NU+Pu239)濃度、Pu 富化度 2、4、6、8、15、30 wt%

3. 機器の制限寸法等の検討条件

3.1 計算コード及び核データライブラリ

SCALE 6 コードシステム[5)]/CSAS シーケンス、ENDF/B-VII 238 群ライブラリを使用する。

3.2 燃料組成条件

硝酸 U/硝酸 Pu 混合水溶液並びに、硝酸 Pu 水溶液を対象とする。

3.2.1 U 濃縮度

検討条件としては、劣化 U として濃縮度（U235 含有率）0.3%（以下、0.3%EU のように示す）、使用済燃料の再処理から回収される U として 1.6%EU が考えられる。臨界上は Pu の寄与が主であり、U のこのような濃縮度差の影響は大きくない。よって、安全評価に用いることを考慮し、1.6%EU（固定）とする。

3.2.2 Pu 同位体組成（パラメータ）

以降、Pu 同位体組成 ○:○:○ の表記は、Pu239:Pu240:Pu241 の組成比を示すこととする。

(1) 既存の臨界安全ハンドブックで設定されている Pu 同位体組成

表 3.2.2-1 に、既存の臨界安全ハンドブックで設定されている Pu 同位体組成を示す。

表 3.2.2-1 既存の臨界安全ハンドブックで設定されている Pu 同位体組成

(1) MOX 取扱施設臨界安全ガイドブック[6)]

PuO_2	MOX
100	---
95:5	80:10:10
80:10:10	71:17:12

(2) 臨界安全ハンドブック・データ集第 2 版 [2)]

$Pu(NO_3)_4$ 水溶液	U、Pu 混合水溶液	PuO_2	MOX
100: 0: 0			100: 0: 0
		95: 5	
80:10:10	80:10:10	80:10:10	80:10:10
71:17:12	71:17:12	71:17:12	71:17:12

(2) 検討する Pu 同位体組成

想定される Pu 同位体組成について、5%刻みで臨界安全上の厳しい順に並べたものを表 3.2.2-2 に示す。これらの Pu 同位体組成を用いて無限体系での k_∞を計算した結果を参考に、以降で用いる同

位体組成を 3～4 種類程度に絞り込むこととした。(4.1 項参照)

表 3.2.2-2 検討する Pu 同位体組成の候補 (ハッチングは結果的に選定したケース)

	fissile%	Pu240%
71:17:12	83	17
60:20:20	80	20
65:20:15	80	20
70:20:10	80	20
60:25:15	75	25
65:25:10	75	25
55:30:15	70	30

表 3.2.2-2 の最上位は、既にフランス UP3、日本の六ヶ所再処理施設で採用されている Pu 同位体組成である[7]。臨界安全ハンドブック第 2 版[8]の図 3.34 に示された「燃焼に伴う ^{240}Pu.total Pu の変化」からは、燃焼度 20 GWD/t 前後を越えた燃料に対してこの組成が安全側になると読める。これより厳しい組成を設定する必要はないと考えられる。

同一 fissile%(あるいは Pu240%)のものは厳しい側として Pu241%が高い方を選定した。fissile 割合の下限(Pu240 の上限)として 70%(Pu240 30%)のケースまでを考慮することとした。以上により選定した 4 種類の Pu 同位体組成を表 3.2.2-2 にハッチングで示してある。

3.2.3 Pu 富化度 (Pu/(Pu+U)重量比)

5、10、20、30、50、100wt%の各 Pu 富化度に対し、濃度サーベイを実施する。

3.2.4 溶液密度

臨界安全ハンドブック・データ集第 2 版[2]に示された SST 式を用いる。溶液温度は 20℃とする。

3.3 その他の条件

(1) 反射条件

水 20cm

(2) 構造材

SUS304 とし、臨界安全ハンドブック・データ集第 2 版[2]の「表 2.8 典型的なステンレス鋼の密度及び組成」を用いる。厚さは、保守的な条件となるよう、評価モデルに応じ個別に定める。

(3) 中性子吸収材

(a) 考慮する中性子吸収材

固定中性子吸収材として、再処理施設では B 入りコンクリートや Cd+ポリエチレンが使用されて

いる [7]。B 入りコンクリートについてはコンクリート組成が不明であることから、Cd+ポリエチレンのみとする。

以下に示す情報を参考に、本データの適用範囲を広めに確保するため、ポリエチレン厚みは10cm、Cd 厚は 0.05cm とする。

(i) Cd+ポリエチレンの使用例

六ヶ所再処理施設 ：Cd 厚 平板槽 0.1 cm、円環槽 0.05cm [7]

東海再処理施設 : Cd 厚 円環槽 0.07、0.095cm [9]

Cd と一緒に用いるポリエチレン厚みの臨界安全計算例 ：円環槽 12cm、平板槽 14cm [12]

(ii) Cd+ポリエチレンの臨界安全ハンドブック等のデータ

ARH-600：隔離厚み[10]

ポリエチレン : 17.5 cm（6.9 inch）

0.05 cm（0.02 inch）Cd＋ポリエチレン: 11 cm（4.3 inch）

(b) Cd とポリエチレンの配置

六ヶ所再処理施設の円環槽では、Cd とポリエチレンを密着させて燃料部から離したモデルとしている [12]。後述の 4.2.2.1(4)項に述べる理由から六ヶ所再処理施設と同様に、Cd とポリエチレンを密着させ、円環面より離した配置とする。

(c) ポリエチレンのみによる中性子相互干渉低減効果の確認

ポリエチレンは水素含有率が大きいため中性子隔離効果も水より大きく、隔離厚さは約 32cm（臨界安全ハンドブック第 2 版 [8]の図 3.20）である。ポリエチレン厚みを 10cm とする場合、平板の複数ユニットあるいは円環槽の内側に設置するポリエチレンでは、実効厚みが 2 倍の 20 cm となるのでかなりの隔離能力を持つ。従って、ポリエチレンのみで十分な場合も考えられるので、ポリエチレンのみ（Cd 無し）の場合も参考情報として計算する。

(d) Cd、ポリエチレンの組成

Cd、ポリエチレンの密度、組成は、SCALE コードシステムの内蔵データを用いる。

4. 計算データ

全濃度安全形状寸法および Pu 濃度制限寸法を求めた。

4.1 無限体系

無限体系の計算は SCALE 6 コードシステム／CSAS1 シーケンス（1 次元計算 XSDRNPM）により行った。

4.1.1 Pu 濃度－k_∞関係

まず最初に、Pu 同位体組成の増倍係数への影響を見るために求めた Pu 濃度－k_∞関係を図 4.1.1-1 に示す。これより以下の傾向が分かる。

- 基本的にいずれの Pu 同位体組成でも k_∞の変化の傾向に大きな違いはない。
- いずれの Pu 同位体組成でも、k_∞が極大値、極小値をとる濃度はそれぞれ約 90gPu/L、約 500gPu/L である。
- Pu240 割合が同じケースでは、Pu241 割合の増加（Pu239 割合の減少）とともにk_∞が増加していく。
- Pu240 割合を 5%上げた場合の k_∞の変化は、Pu239 あるいは Pu241 を 5%下げた場合（65:20:15、60:20:20→60:25:15）ではどの Pu 濃度に対しても k_∞が単調に減少するが、Pu241 を 5%上げ、Pu239 を 10%下げた場合（70:20:10→60:25:15）では、keff が極小値を過ぎた Pu 濃度 500g/L 以降で Pu 濃度が高くなるにつれて k_∞の差は縮まっていく。この傾向は、Pu 同位体組成変化（71:17:12→65:20:15）の場合も同様な傾向がある。さらに Pu241 割合を上げると（71:17:12→60:20:20）Pu240 割合が増加し fissile 割合（Pu239+Pu241）が減少しているにもかかわらず、ある Pu 濃度以上では（中性子スペクトルが硬くなると）k_∞が増加するという状況が生じてくる。

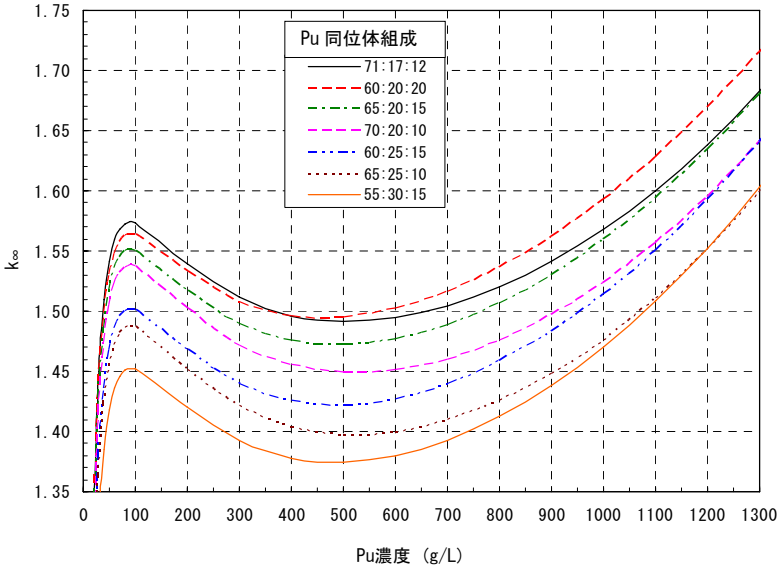


図 4.1.1-1 Pu 濃度－k_∞関係 （$Pu(NO_3)_4$ 水溶液）

4.1.2 U(濃縮度 1.6%)、Pu 濃度－k_∞関係

U、Pu 混合硝酸溶液の場合の増倍係数への影響を見るために求めた U、Pu 濃度－k_∞関係を図 4.1.2-1 に示す。U の濃縮度は 1.6%である。これより以下の傾向が分かる。

- 基本的にいずれの Pu 同位体組成でも k_∞の変化の傾向に大きな違いはない。
- Pu 濃度が 10 g/L 以下では、U 濃度が約 900g/L 以上の最適濃度のときに k_∞が最大となり、その最適濃度は Pu 濃度の増加とともに減少していく
- Pu 濃度が 3 g/L 以下では全 U 濃度で k_∞＜0.98 であり、未臨界である。
- Pu 濃度が 15 g/L 以上では、U が無い時が一番厳しく、U 濃度の増加とともに k_∞は減少する

図 4.1.2-1 から k_∞≦0.95、0.98 となる Pu、U 濃度を表 4.1.2-1 に示した。

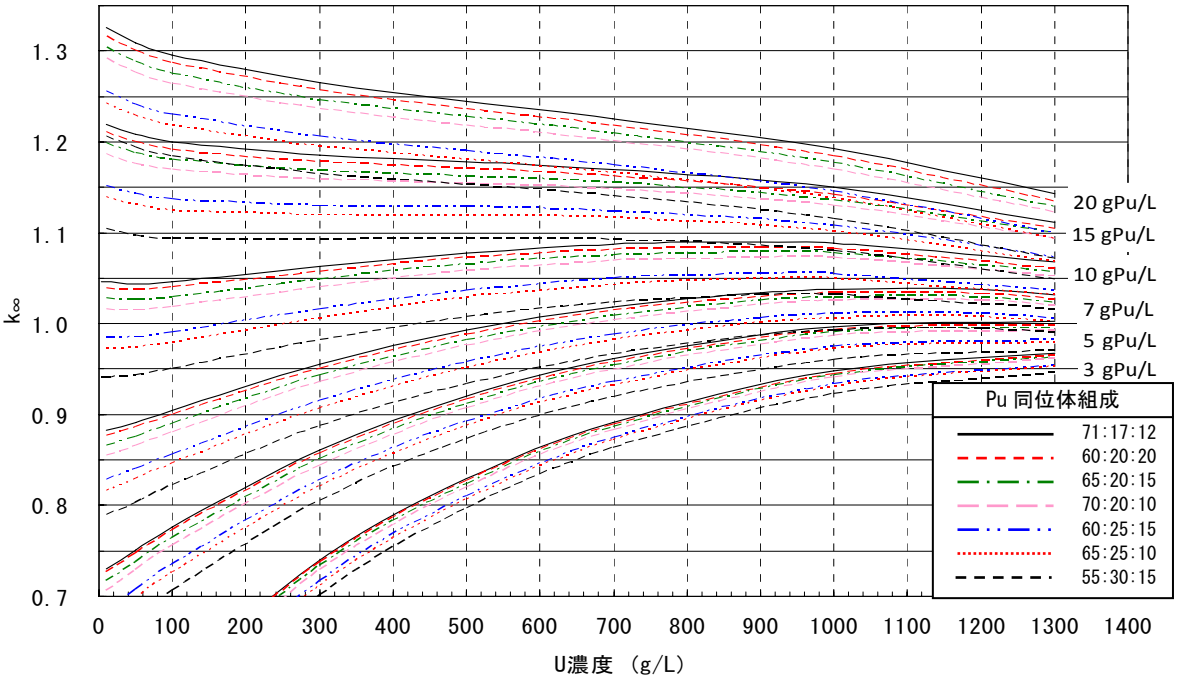


図 4.1.2-1　U(濃縮度 1.6%)、Pu 濃度－k_∞関係 （$UO_2(NO_3)_2$-$Pu(NO_3)_4$ 水溶液）

表 4.1.2-1　$UO_2(NO_3)_2$(U 濃縮度 1.6%)-$Pu(NO_3)_4$ 水溶液系の k_∞≦0.95、0.98 となる U、Pu 濃度

Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成						
	71:17:12	60:20:20	65:20:15	70:20:10	60:25:15	65:25:10	55:30:15
	k_∞≦0.98 となる U 濃度(g/L)						
3	＞1300(全濃度)						
5	830	860	890	920	1100	1300	＞1300(全濃度)
7	420	450	490	520	640	680	820
	k_∞≦0.95 となる U 濃度(g/L)						
3	1020	1040	1060	1090	1210	1260	＞1300(全濃度)
5	630	650	670	700	780	810	900
7	270	290	330	360	450	490	590

4.1.3 パラメータとする Pu 同位体組成の絞り込み

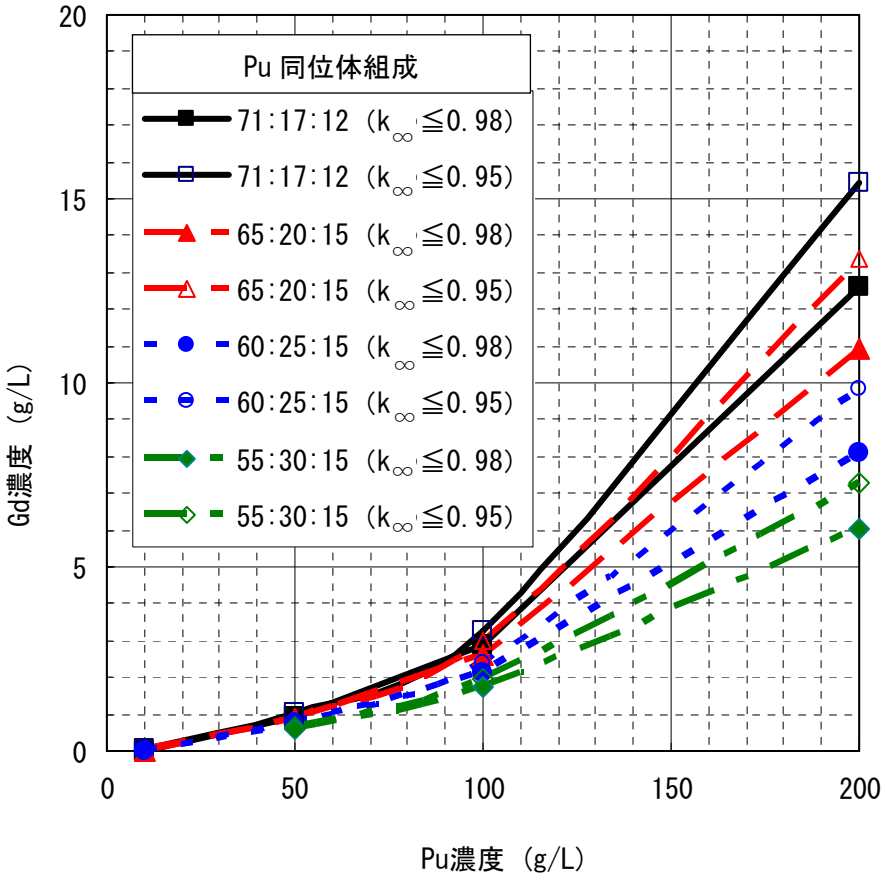
4.1.1、4.1.2 項の結果では、表 3.2.2-2 の 7 ケースの Pu 同位体組成の k_∞への影響は比較的スムーズであるため、同じ fissile%（あるいは Pu240%）のケースから厳しいものをそれぞれ 1 ケース選ぶこととした。また、データを補間することを考えれば、図 4.1.1-1 及び図 4.1.2-1 の曲線の間隔が適度に離れていることが望ましいと考えられることから、表 3.2.2-2 のハッチングした 4 ケースを選定し、以下の計算のパラメータとした。

4.1.4 Pu 濃度－必要 Gd 濃度関係

$k_\infty \leqq 0.95$、0.98 となる Pu濃度－Gd濃度関係を図 4.1.4-1 に示す。Gd は硝酸 Gd 溶液（$Gd(NO_3)_3$）として添加されるが、これを考慮した溶液の密度評価式がないため、計算では Gd 溶液添加による、他成分の組成、密度への影響を無視し、金属 Gd が単体で付加された形とする。Gd 濃度が数 g/L までは溶液の組成、密度への影響は無視できるものと考えられる。

再処理工程で Gd を使用できるのは、Gd が U、Pu から分離されることのない前処理工程か、溶液仕様上それらの存在が許容される廃液処理工程となる。

例えば、前処理工程での Pu 濃度は、溶解液の濃度を約 400 g(U+Pu)/L、Pu 富化度を約 25%とすると約 100 g/L となる。図 4.1.4-1 より、Pu 濃度が 100 g/L 以下では、必要 Gd 濃度は約 3 g/L 以下であり、Pu 同位体組成による必要 Gd 濃度の差も 1 g/L 未満と小さい。Pu 濃度 200 g/L では、必要 Gd 濃度は 10 g/L 前後になり、Pu 同位体組成による必要 Gd 濃度の差も数 g/L に広がってくる。



	k_∞≦0.95				k_∞≦0.98			
Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成				Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	Gd 濃度 (g/L)				Gd 濃度 (g/L)			
10	0.04	0.03	0.02		0.03	0.02	0.002	
50	1.1	0.95	0.80	0.67	0.92	0.85	0.72	0.60
100	3.3	3.0	2.5	2.0	2.9	2.7	2.2	1.8
200	15.5	13.4	9.9	7.3	12.6	11.0	8.1	6.1

図 4.1.4-1　k_∞≦0.95、0.98 となる Pu 濃度－Gd 濃度関係 （$Pu(NO_3)_4$ 水溶液）

4.2 有限体系

4.2.1 無限円筒直径

無限円筒の計算は SCALE6 コードシステム／CSAS1 シーケンス（1 次元計算 XSDRNPM）により行った。

4.2.1.1 条件設定

(1) 機器構造材（肉厚）

有限体系では、機器構造材（肉厚）の考慮の有無が制限寸法に影響してくる。まず最初に、この肉厚の影響について 1 つの条件で確認した。

ドイツの臨界安全ハンドブック[11)]では、構造材を考慮した場合のステンレス鋼（SUS）厚みとして、円筒直径の場合 0.3cm、平板厚みの場合 0.6cm のデータが掲載されている（2 項の表 2-1 参照）。これらの値は構造強度、腐食代等を考慮して最低限考慮できる厚さであると考えられる。構造材を無視した場合と、0.3cm の SUS304 を考慮した場合の 溶液半径－keff の関係を図 4.2.1.1-1 に示す。

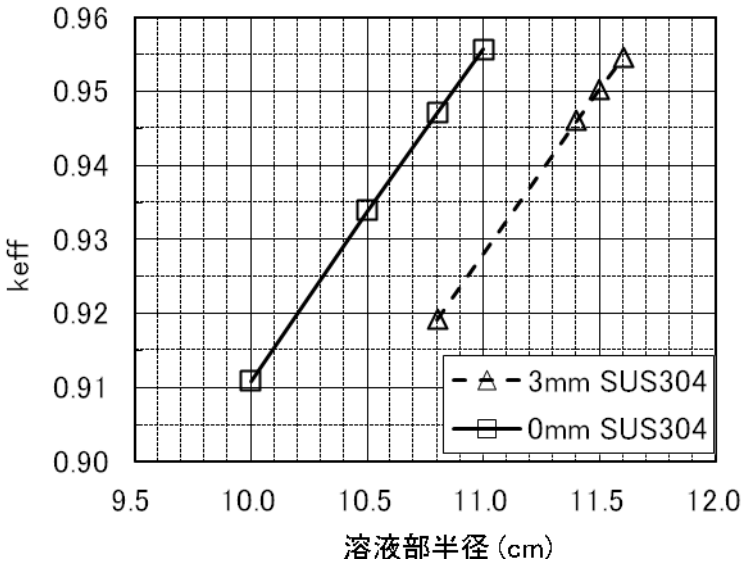


図 4.2.1.1-1 無限円筒の半径－keff の関係（構造材 SUS304 の影響）

（Pu 同位体組成： 65:20:15、 Pu 富化度： 30 wt%、U 濃縮度 1.6 wt%、、20cm 水反射）
（最適濃度 86gPu/L、200.7gU/L）

この条件では、構造材を無視した場合と考慮した場倍の keff≦0.95 となる制限半径はそれぞれ 10.8、11.4 cm となり、その差は 0.6 cm（約 5%）となる。この差が大きいか小さいかは状況によるが、以降では、制限寸法が過度に保守的な設定とならないように、構造材として 0.3cm の SUS304 を考慮することとする。

4.2.1.2 単一ユニットの制限寸法

(1) 未臨界寸法

前項の条件設定に基づき、図 4.2.1.2-1 に示す計算モデルを用い、6 種類の Pu 富化度について、4 種類の Pu 同位体組成をパラメータとして、keff+3σ≦0.95 を満たす Pu 濃度－溶液部円筒半径の関係を求めた結果を図 4.2.1.2-2(1)～(6)に示す。同じデータについて、Pu 同位体組成毎に Pu 富化度をパラメータとしてプロットしたものを図 4.2.1.2-3(1)～(4)に示す。これらの結果から、Pu 富化度－全濃度安全円筒半径の関係を求めたものを図 4.2.1.2-4 に示す。さらに、Pu 同位体組成毎に Pu 濃度をパラメータとして Pu 富化度－溶液部円筒半径の関係を求めたものを図 4.2.1.2-5(1)～(4)に示す。

図 4.2.1.2-5 から、Pu 濃度一定としたとき、溶液部半径は Pu 濃度 10 g/L の場合を除き、Pu 富化度の増加とともに単調に減少していくことが分かる。Pu 濃度 10g/L の場合に、最初の Pu 富化度 20～30wt%までは溶液部半径が増加していく理由は次のように理解される。

4.1.2 項で図 4.1.2-1 の U（濃縮度 1.6wt%）、Pu 濃度－k_∞関係について説明したように、Pu 濃度が 10g/L を超えると、k_∞は U 濃度の増加（Pu 富化度の減少）とともに減少していく。つまり、Pu 富化度が増加すると keff が増加するので、溶液部半径は減少する。Pu 濃度が 7 g/L 以下のときは Pu 単体では臨界にならず、U 濃度が 1000 g/L を超える範囲まで U 濃度とともに k_∞は単調増加する。Pu 濃度が 10 g/L のときは両者の中間の傾向を示し、U 濃度が 100 g/L 未満のところで k_∞が極小値になり、その後 k_∞は増加し、900g/L 近辺（Pu 富化度 10wt%近辺）で極大値になる。つまり、U 濃度 100g/L 以上（Pu 富化度が数%）のところから U 濃度が減少（Pu 富化度が増加）してくると k_∞は減少し溶液部半径は増加する。さらに U 濃度が約 40～30g/L（Pu 富化度約 20～30wt%）のところで k_∞は極小値となり溶液部半径は極大値に達し、さらに U 濃度が減少（Pu 富化度が増加）すると制限溶液部半径はゆるやかに減少していく。

これらの図から、以下のことが分かる。

- 計算範囲とした Pu 同位体組成の違いによる溶液部半径が最少となる最適 Pu 濃度の差はほとんどない （図 4.2.1.2-2(1)～(6)参照）
- Pu 富化度が増加すると、最適 Pu 濃度は増加していく （図 4.2.1.2-3(1)～(4)参照）

(2) 全濃度安全形状寸法から Pu 富化度または Pu 濃度を制限することによる体積増加割合

Pu 富化度が変動しうる貯槽に対して Pu 富化度 100%（Pu 溶液）の全濃度安全形状寸法で管理できれば、臨界安全管理上は Pu 富化度の確認の必要がない。また、ある Pu 富化度において全濃度安全形状寸法で管理できれば、臨界安全管理上は Pu 濃度の確認の必要がない。このような臨界安全管理は最も単純で安全な管理となるが、寸法が大きく制限されるため貯槽の体積が制約される。

以下では、Pu 富化度または Pu 濃度を管理することで寸法制限を緩和し槽の体積を増加させようとする場合の効果について検討した。

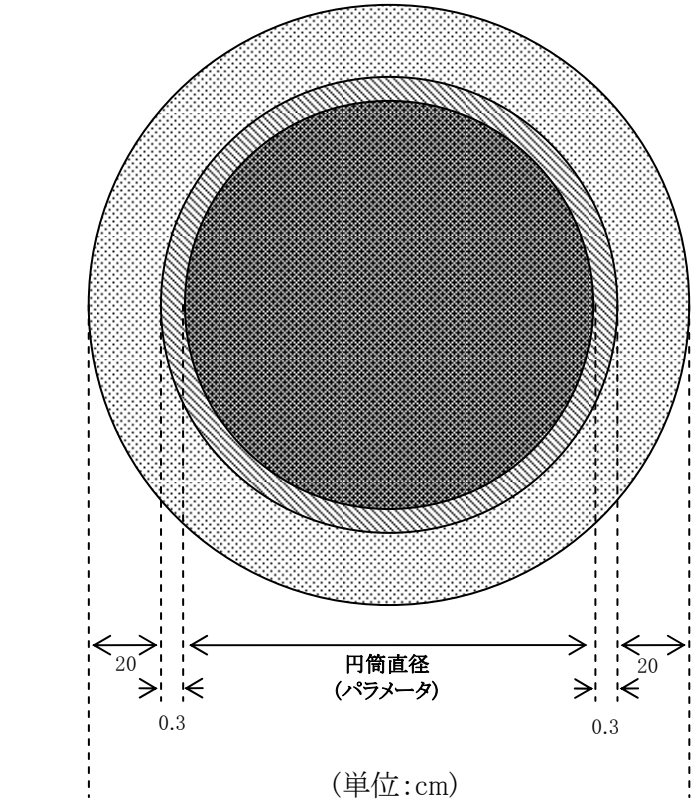
図 4.2.1.2-4 より、Pu 富化度 100%（Pu 溶液）の全濃度安全形状寸法で定まる槽の体積を、Pu 富化度を制限することにより所定の割合だけ増加させるためには、Pu 富化度をいくらまで制限すればよいかについて読み取ると、Pu 同位体組成に関わらず、以下の値となる。

体積増加割合	制限 Pu 富化度
0 %	100 wt% (基準)
30 %	約 34 wt%
50 %	約 20 wt%
100 %	約 10 wt%

図 4.2.1.2-2 あるいは図 4.2.1.2-3 から、全濃度安全形状寸法で定まる槽の体積を所定の割合だけ増加させるために、Pu 濃度をいくらに制限すればよいか、について読み取った。その関係について、Pu 富化度をパラメータにしたもの、体積増加割合をパラメータにしたものを図 4.2.1.2-6 の(1)(2)にそれぞれ示す。

この図は Pu 同位体組成 65:20:15 の場合のものであるが、他の Pu 同位体組成（71:17:12、60:25:15、55:30:15）の場合の制限 Pu 濃度との差は高々 3 g/L 程度であり、ほとんど変わらない。この図から、以下のことが分かる。

- Pu 富化度が高い程、全濃度安全形状寸法での体積を所定の割合だけ増加させるために必要な Pu 制限濃度は高くなる。（図 4.2.1.2-6 の(1)参照）
- この体積増加割合を 30%以上とするために必要な Pu 制限濃度は、Pu 富化度に依存して 19～45 g/L 以下に、100%（2 倍）にするためには 14～26 g/L 以下にしなければならない。（図 4.2.1.2-6 の(2)参照）

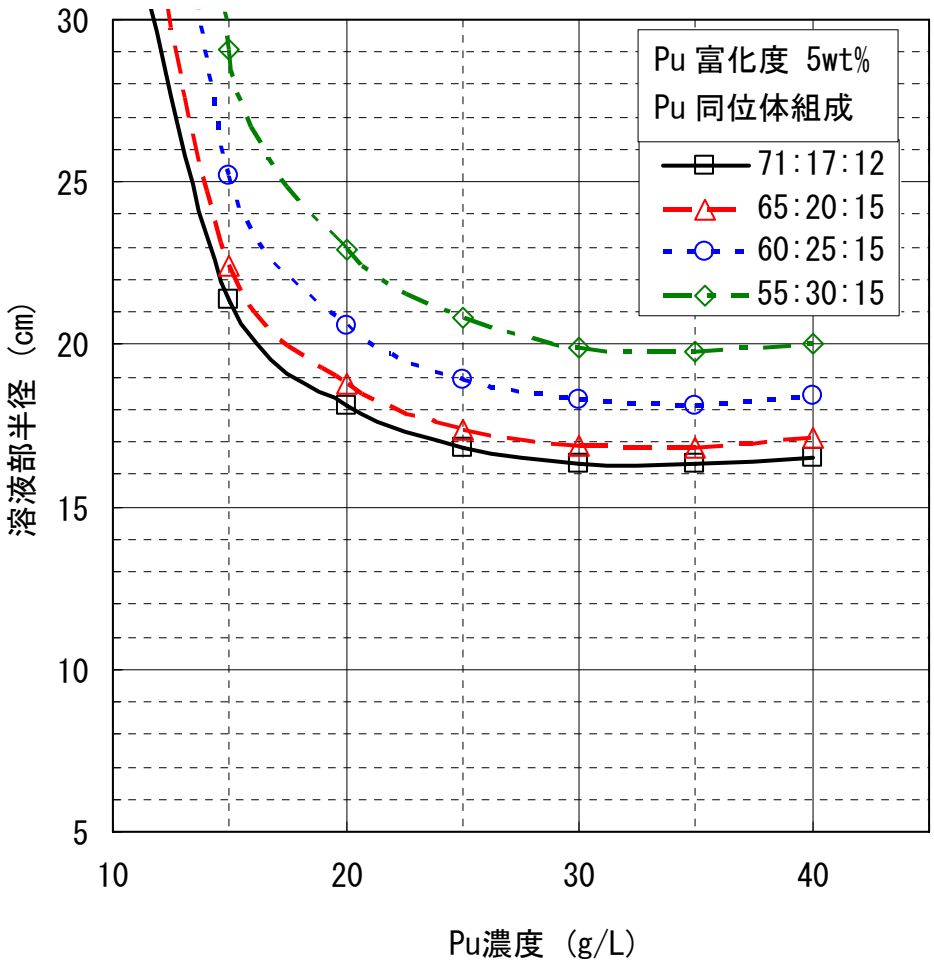


$UO_2(NO_3)_2$-$Pu(NO_3)_4$
水溶液

SUS304

水(反射体)

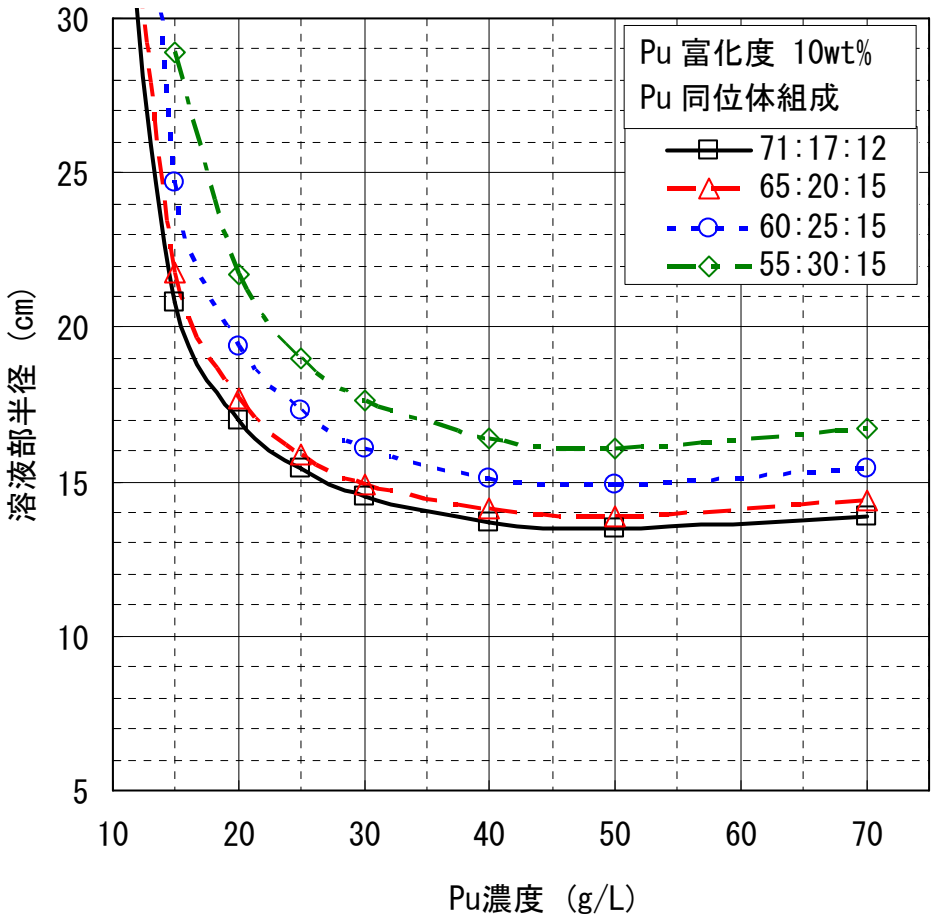
図 4.2.1.2-1　無限円筒　単一ユニット　計算モデル



Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部半径 (cm)			
10	35.3	38.7	52.0	100.7
15	21.4	22.4	25.2	29.1
20	18.1	18.8	20.6	22.9
25	16.8	17.4	18.9	20.8
30	**16.3**	16.9	18.3	19.9
35	**16.3**	**16.8**	**18.1**	**19.8**
40	16.5	17.1	18.4	20.0

（太字は最小値）

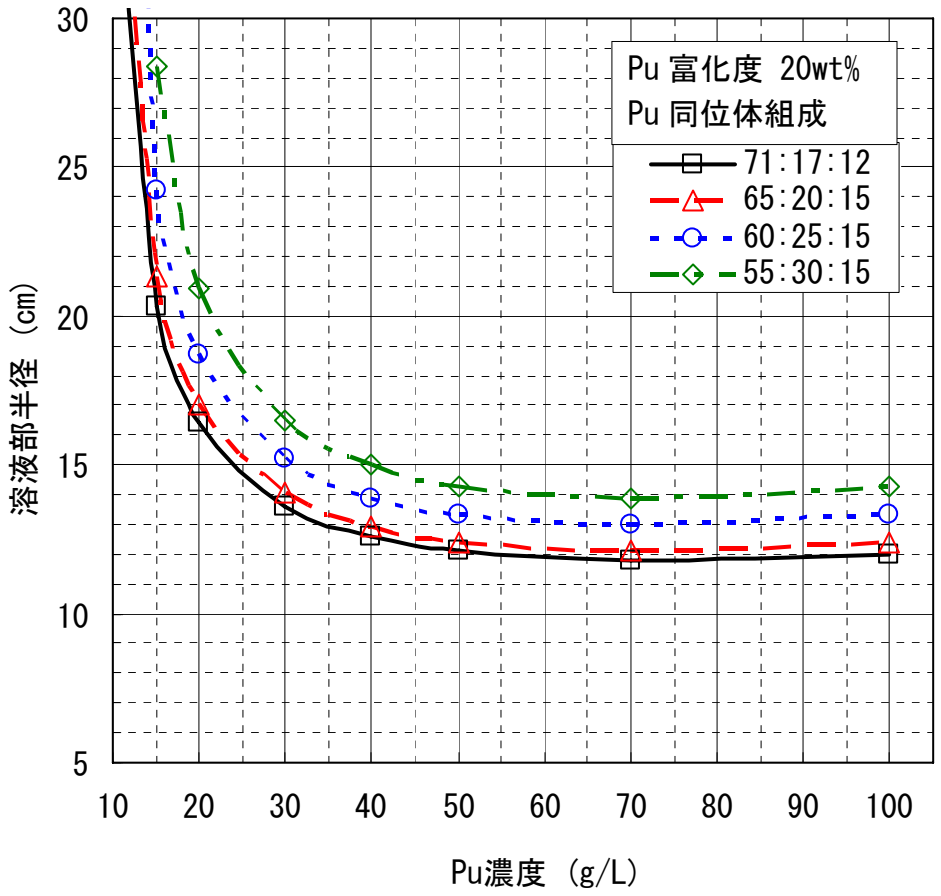
図 4.2.1.2-2 (1)　無限円筒　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部半径（keff≦0.95）の関係
（Pu 富化度 5wt%、U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射）



Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部半径 (cm)			
10	36.9	41.2	60.5	∞
15	20.8	21.8	24.7	28.9
20	17.0	17.7	19.4	21.7
25	15.4	15.9	17.3	19.0
30	14.5	14.9	16.1	17.6
40	13.7	14.1	15.1	16.4
50	**13.5**	**13.9**	**14.9**	**16.1**
70	13.9	14.4	15.4	16.7

（太字は最小値）

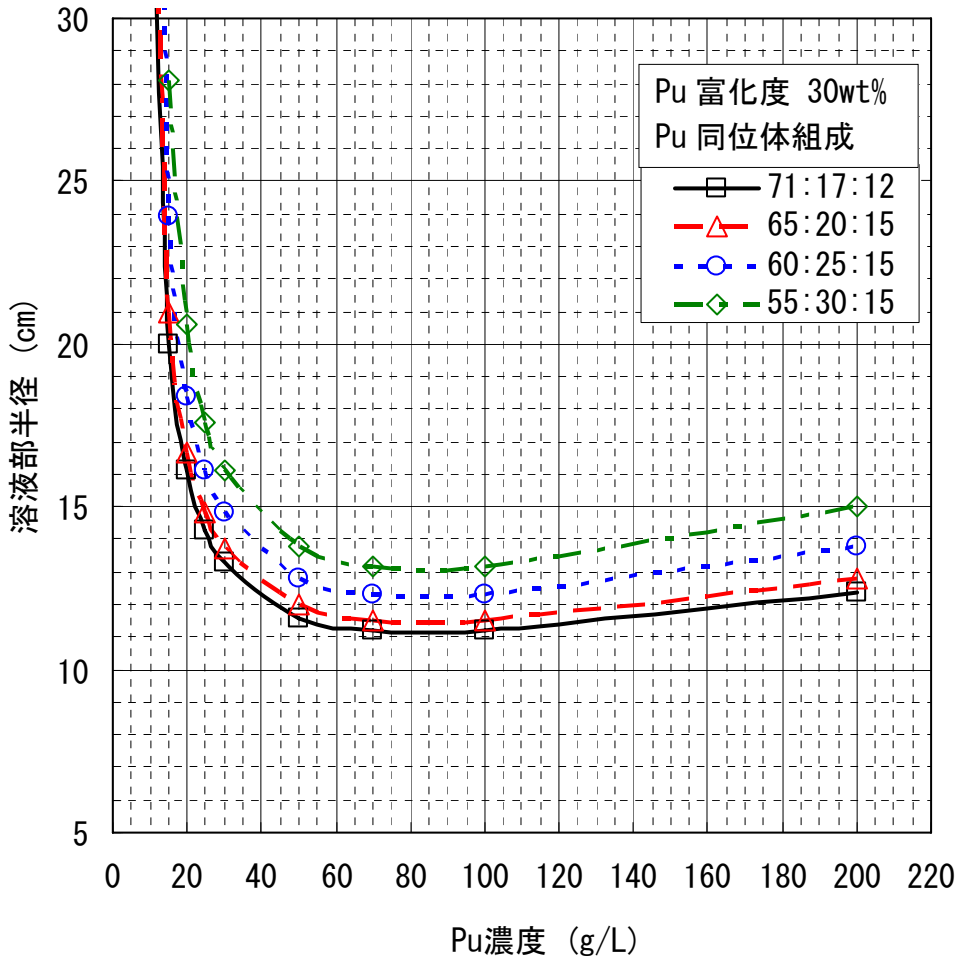
図 4.2.1.2-2 (2)　無限円筒　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部半径（keff≦0.95）の関係
（Pu 富化度 10wt%、U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射）



Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部半径 (cm)			
10	37.2	41.9	64.5	∞
15	20.3	21.3	24.2	28.4
20	16.4	17.0	18.7	20.9
30	13.6	14.1	15.2	16.5
40	12.6	12.9	13.9	15.0
50	12.1	12.4	13.3	14.3
70	**11.8**	**12.1**	**13.0**	**13.9**
100	12.0	12.4	13.3	14.3

（太字は最小値）

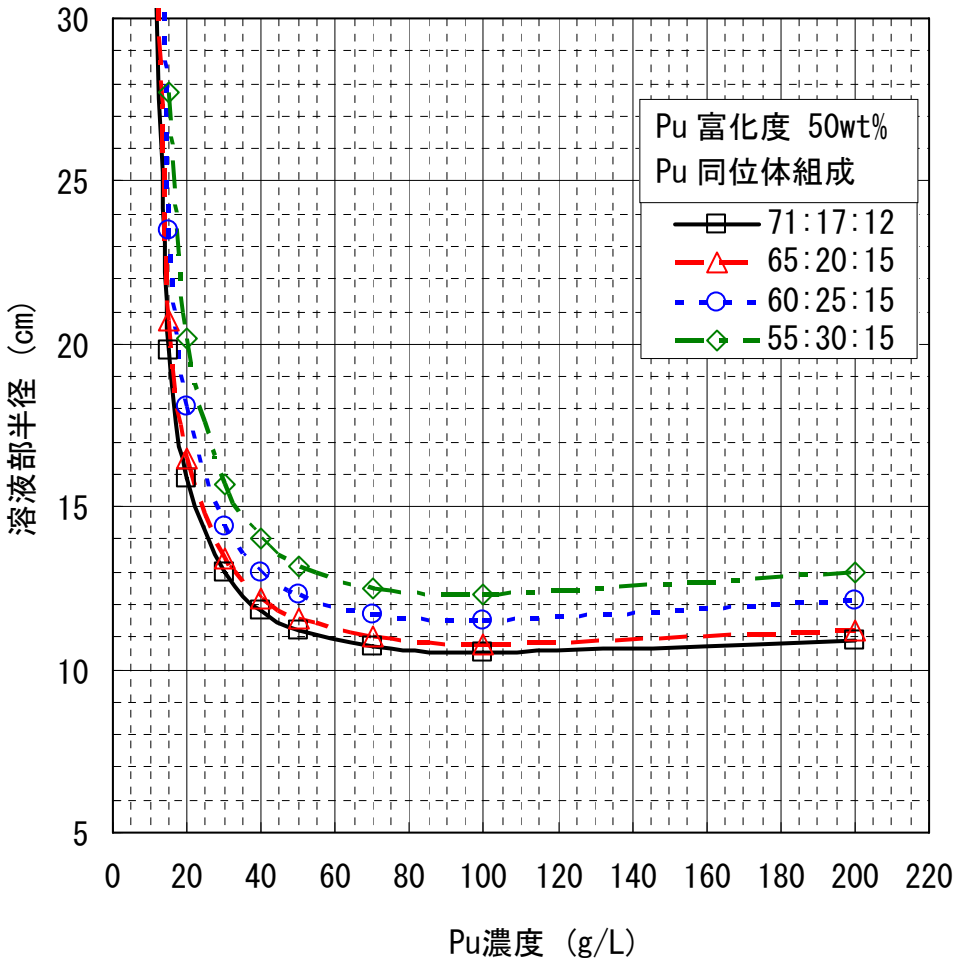
図 4.2.1.2-2 (3)　無限円筒　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部半径（keff≦0.95）の関係
（Pu 富化度 20wt%、U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射）



Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部半径 (cm)			
10	37.1	41.8	65.9	∞
15	20.0	21.0	23.9	28.1
20	16.1	16.7	18.4	20.6
25	14.3	14.8	16.1	17.6
30	13.3	13.7	14.8	16.1
50	11.6	12.0	12.8	13.8
70	**11.2**	**11.5**	**12.3**	**13.2**
100	**11.2**	**11.5**	**12.3**	**13.2**
200	12.4	12.8	13.8	15.0

（太字は最小値）

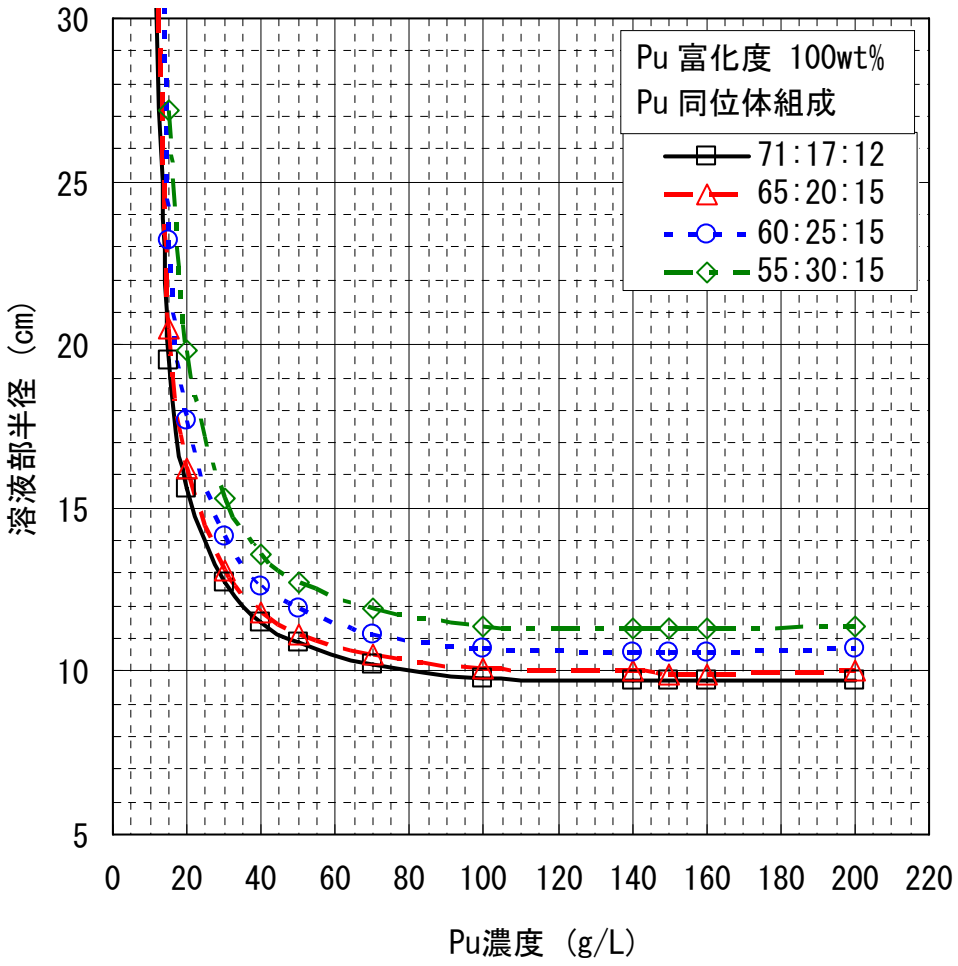
図 4.2.1.2-2 (4)　無限円筒　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部半径（keff≦0.95）の関係
（Pu 富化度 30wt%、U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射）



Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部半径 (cm)			
10	36.9	41.6	64.8	∞
15	19.8	20.7	23.5	27.7
20	15.9	16.5	18.1	20.2
30	13.0	13.4	14.4	15.7
40	11.8	12.2	13.0	14.0
50	11.2	11.6	12.3	13.2
70	10.7	11.0	11.7	12.5
100	**10.5**	**10.8**	**11.5**	**12.3**
200	10.9	11.2	12.1	13.0

（太字は最小値）

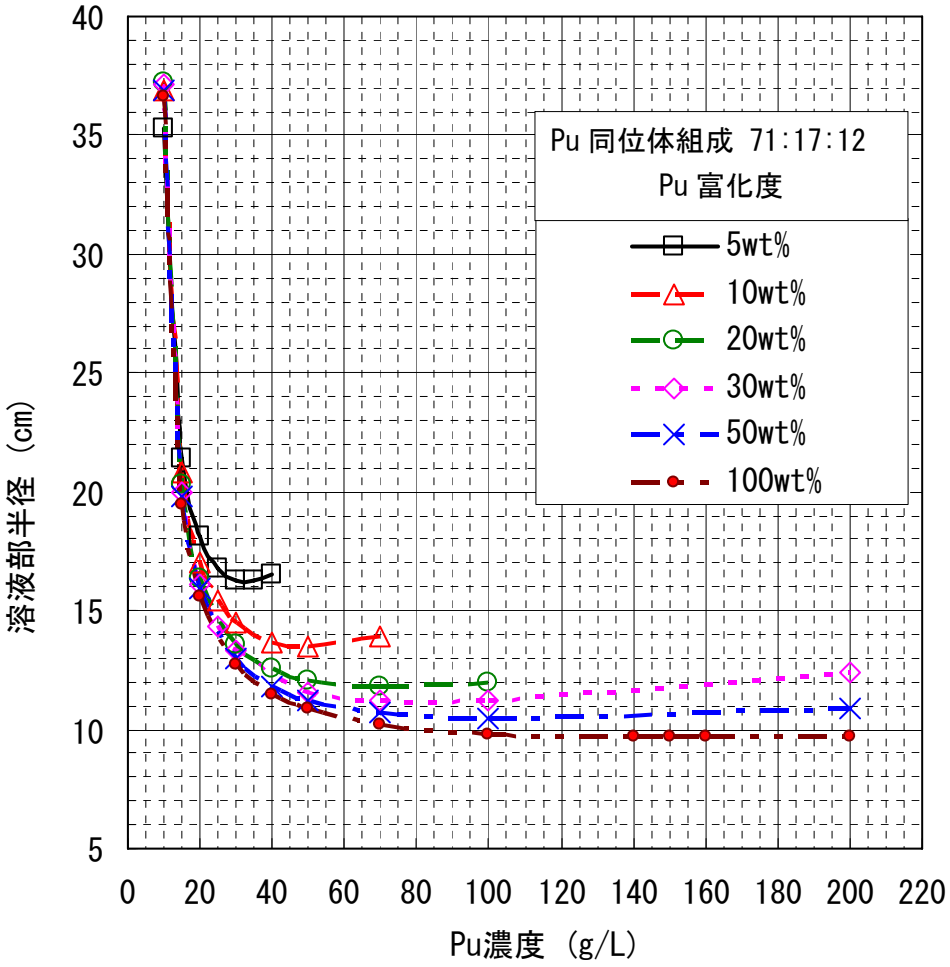
図 4.2.1.2-2 (5)　無限円筒　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部半径（keff≦0.95）の関係
（Pu 富化度 50wt%、U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射）



Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部半径 (cm)			
10	36.6	41.2	64.2	∞
15	19.5	20.5	23.2	27.2
20	15.6	16.2	17.7	19.8
30	12.7	13.1	14.1	15.3
40	11.5	11.8	12.6	13.6
50	10.9	11.1	11.9	12.7
70	10.2	10.5	11.1	11.9
100	9.8	10.1	10.7	11.4
140	**9.7**	10.0	**10.6**	**11.3**
150	**9.7**	**9.9**	**10.6**	**11.3**
160	**9.7**	**9.9**	**10.6**	**11.3**
200	**9.7**	10.0	10.7	11.4

（太字は最小値）

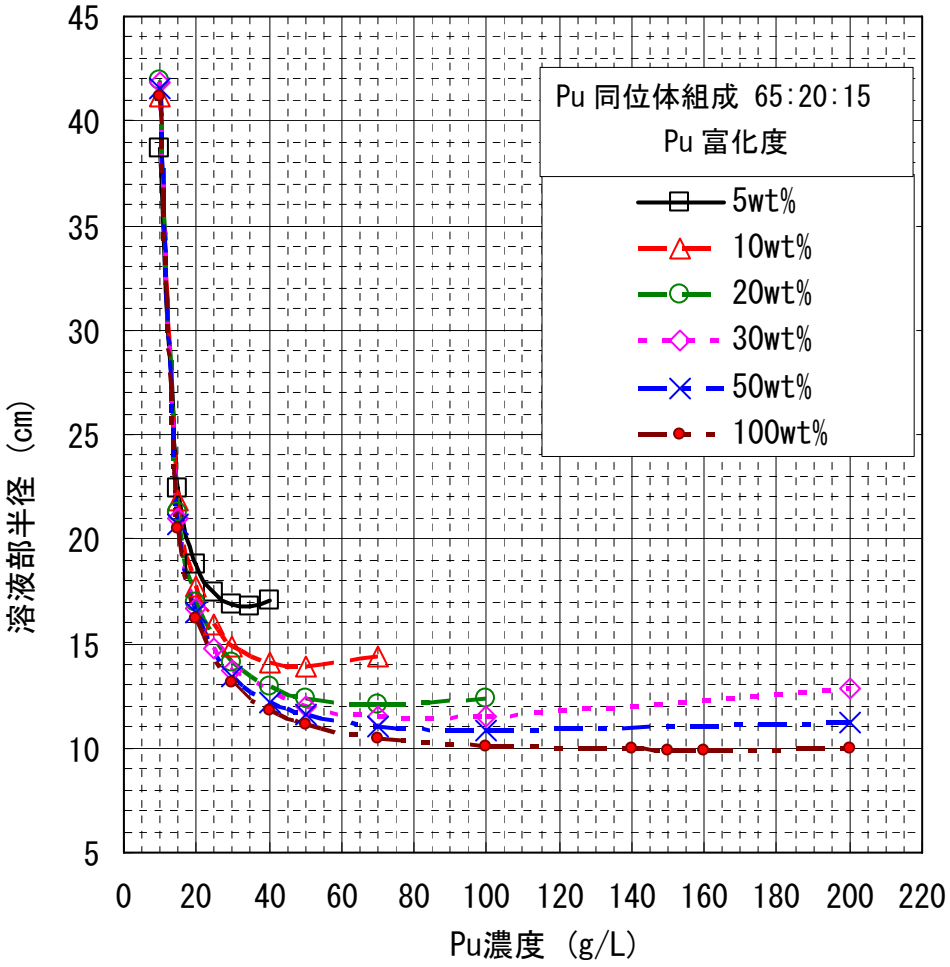
図 4.2.1.2-2 (6)　無限円筒　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部半径（keff≦0.95）の関係
（Pu 富化度 100wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射）



Pu 濃度 (g/L)	Pu 富化度 (wt%)					
	5	10	20	30	50	100
	溶液部半径 (cm)					
10	35.3	36.9	37.2	37.1	36.9	36.6
15	21.4	20.8	20.3	20.0	19.8	19.5
20	18.1	17.0	16.4	16.1	15.9	15.6
25	16.8	15.4		14.3		
30	**16.3**	14.5	13.6	13.3	13.0	12.7
35	**16.3**					
40	16.5	13.7	12.6		11.8	11.5
50		**13.5**	12.1	11.6	11.2	10.9
70		13.9	**11.8**	**11.2**	10.7	10.2
100			12.0	**11.2**	**10.5**	9.8
140						**9.7**
150						**9.7**
160						**9.7**
200				12.4	10.9	**9.7**

（太字は最小値）

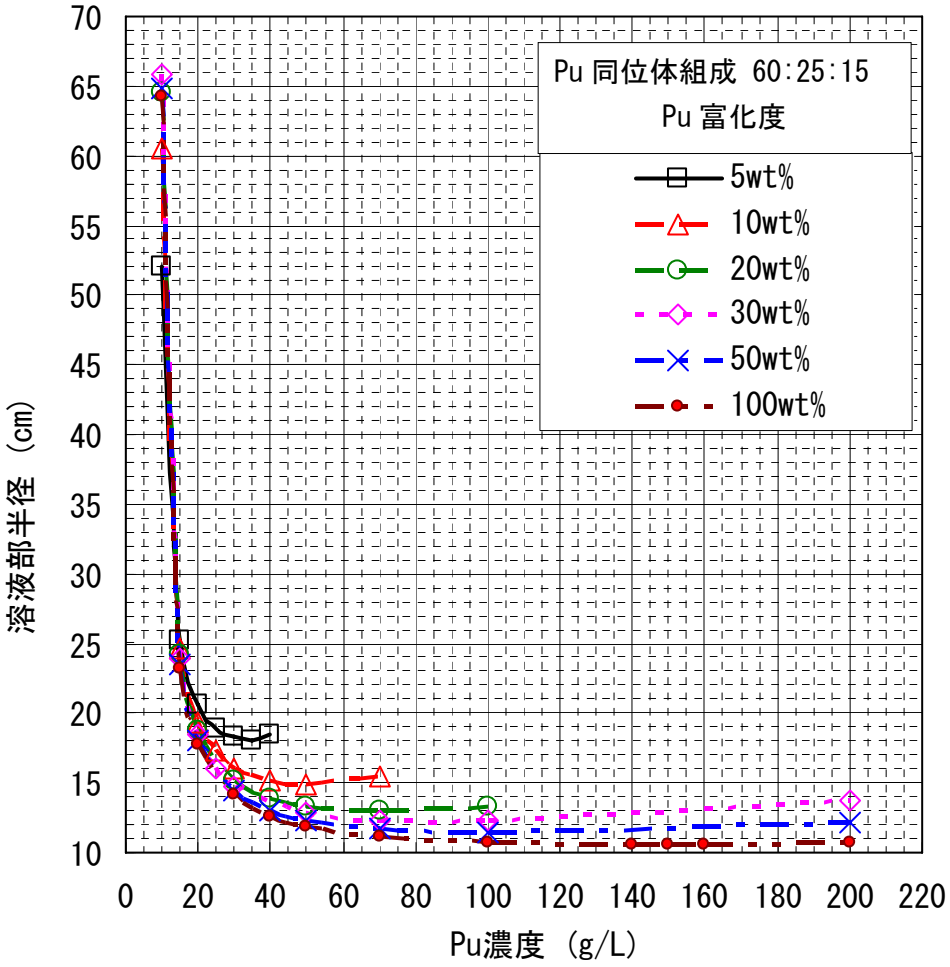
図 4.2.1.2-3 (1)　無限円筒　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部半径（keff≦0.95）の関係
（Pu 同位体組成 71:17:12、U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射）



Pu 濃度 (g/L)	Pu 富化度 (wt%)					
	5	10	20	30	50	100
	溶液部半径 (cm)					
10	38.7	41.2	41.9	41.8	41.6	41.2
15	22.4	21.8	21.3	21.0	20.7	20.5
20	18.8	17.7	17.0	16.7	16.5	16.2
25	17.4	15.9		14.8		
30	16.9	14.9	14.1	13.7	13.4	13.1
35	**16.8**					
40	17.1	14.1	12.9		12.2	11.8
50		**13.9**	12.4	12.0	11.6	11.1
70		14.4	**12.1**	**11.5**	11.0	10.5
100			12.4	**11.5**	**10.8**	10.1
140						10.0
150						**9.9**
160						**9.9**
200				12.8	11.2	10.0

（太字は最小値）

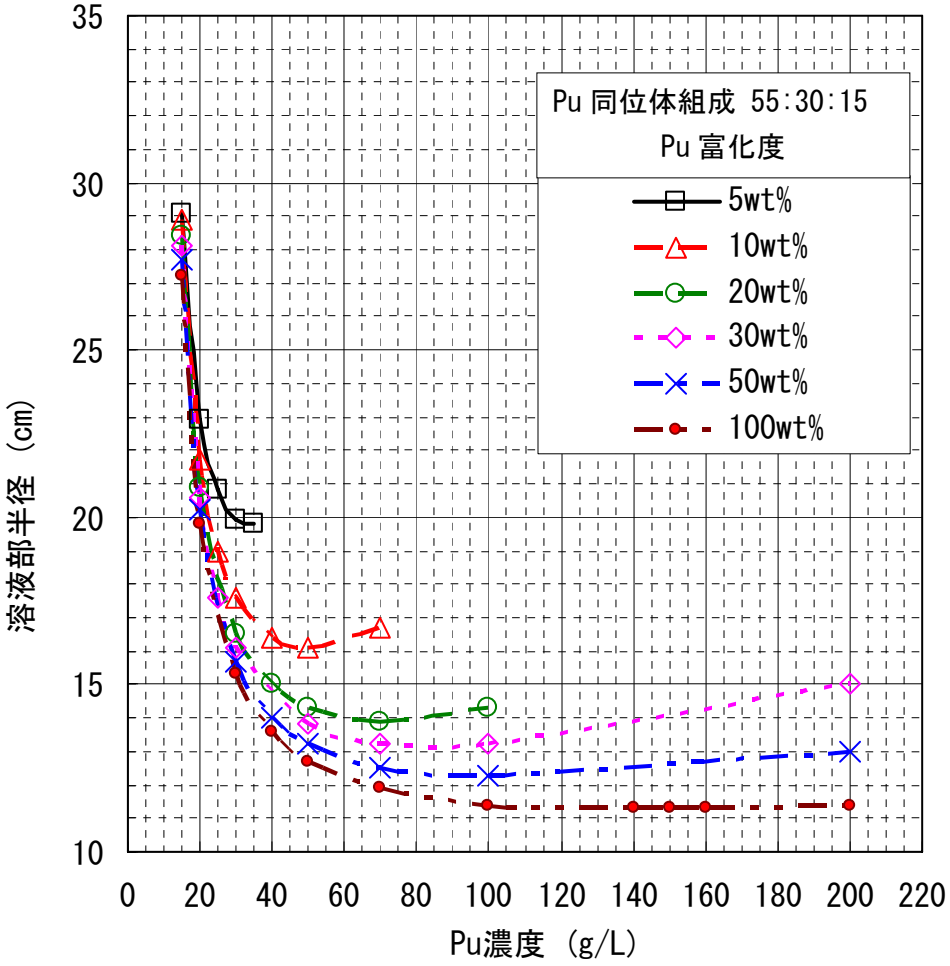
図 4.2.1.2-3 (2)　無限円筒　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部半径（keff≦0.95）の関係
（Pu 同位体組成 65:20:15、U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射）



Pu 濃度 (g/L)	Pu 富化度 (wt%)					
	5	10	20	30	50	100
	溶液部半径 (cm)					
10	52.0	60.5	64.5	65.9	64.8	64.2
15	25.2	24.7	24.2	23.9	23.5	23.2
20	20.6	19.4	18.7	18.4	18.1	17.7
25	18.9	17.3		16.1		
30	18.3	16.1	15.2	14.8	14.4	14.1
35	**18.1**					
40	18.4	15.1	13.9		13.0	12.6
50		**14.9**	13.3	12.8	12.3	11.9
70		15.4	**13.0**	**12.3**	11.7	11.1
100			13.3	**12.3**	**11.5**	10.7
140						**10.6**
150						**10.6**
160						**10.6**
200				13.8	12.1	10.7

（太字は最小値）

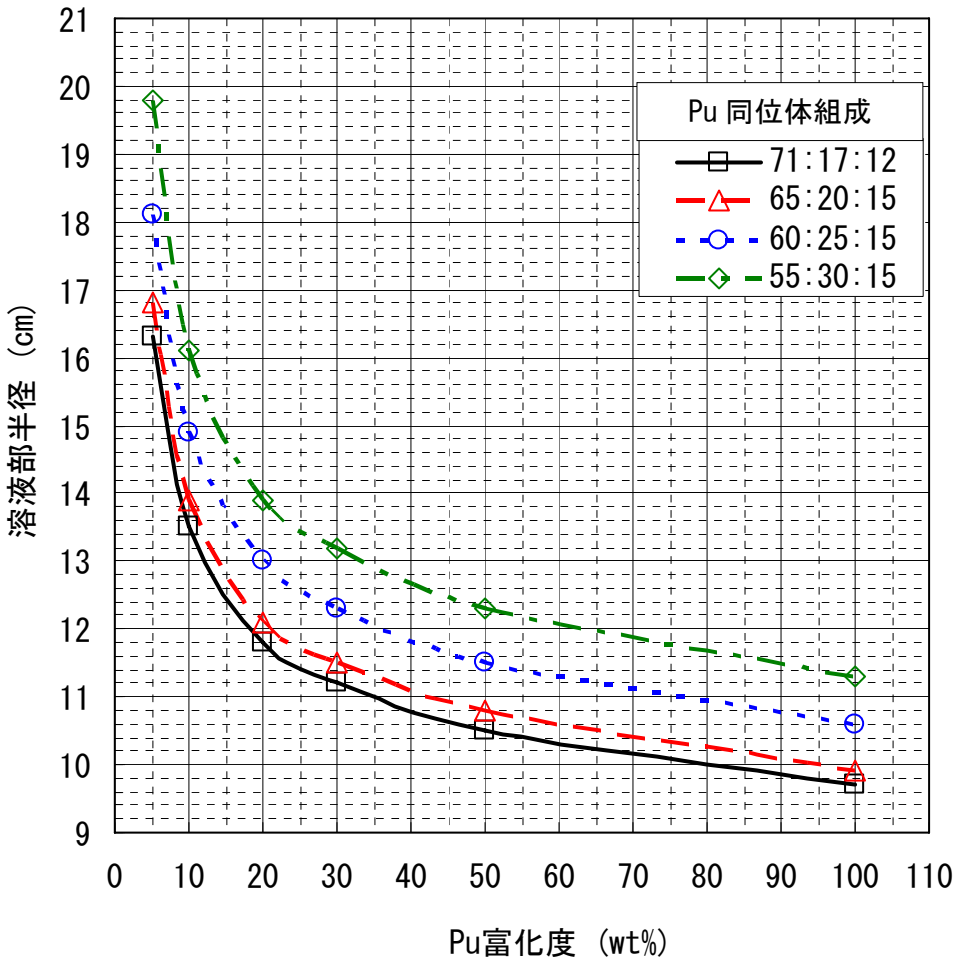
図 4.2.1.2-3 (3)　無限円筒　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部半径（keff≦0.95）の関係
（Pu 同位体組成 60:25:15、U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射）



Pu 濃度 (g/L)	Pu 富化度 (wt%)					
	5	10	20	30	50	100
	溶液部半径 (cm)					
10	100.7	∞	∞	∞	∞	∞
15	29.1	28.9	28.4	28.1	27.7	27.2
20	22.9	21.7	20.9	20.6	20.2	19.8
25	20.8	19.0		17.6		
30	19.9	17.6	16.5	16.1	15.7	15.3
35	**19.8**					
40	20.0	16.4	15.0		14.0	13.6
50		**16.1**	14.3	13.8	13.2	12.7
70		16.7	**13.9**	**13.2**	12.5	11.9
100			14.3	**13.2**	**12.3**	11.4
140						**11.3**
150						**11.3**
160						**11.3**
200				15.0	13.0	11.4

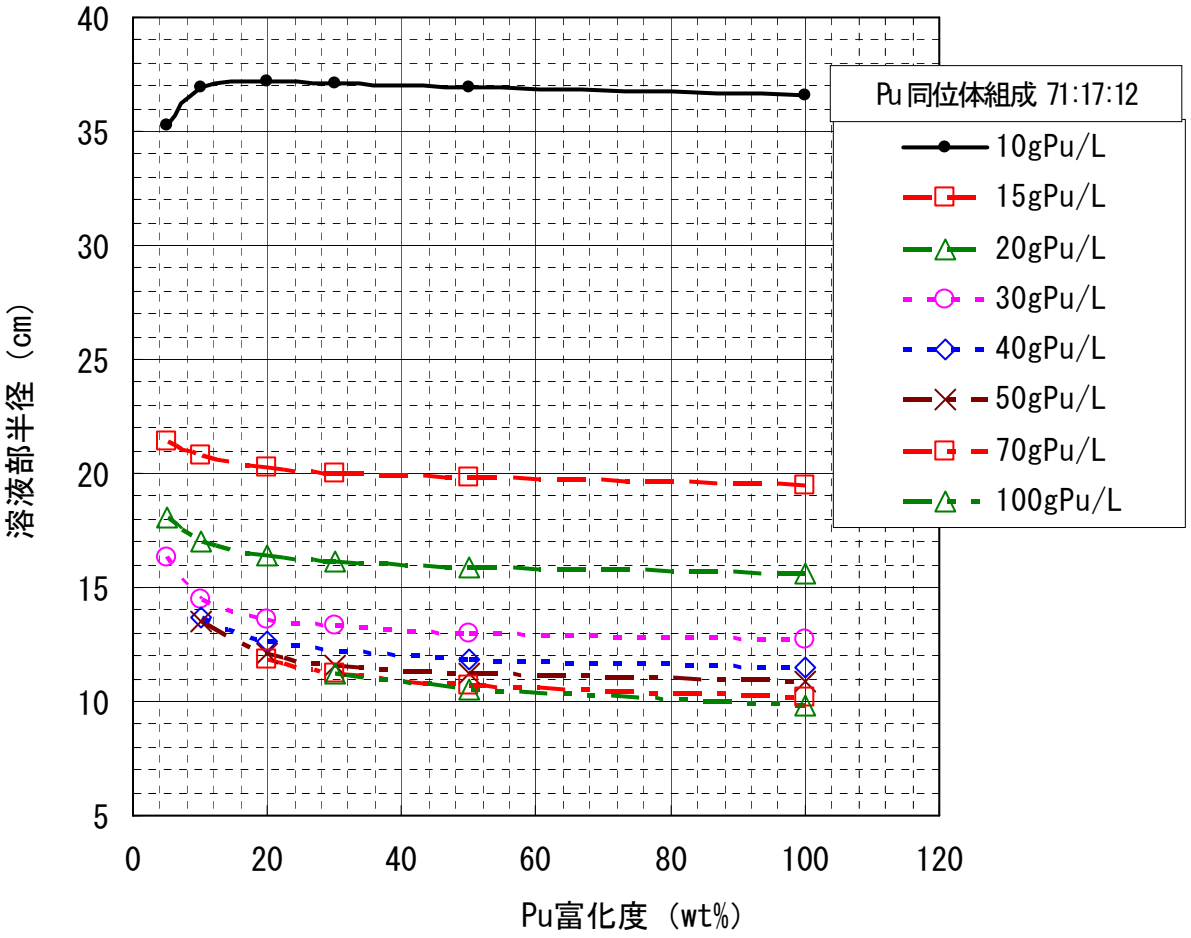
（太字は最小値）

図 4.2.1.2-3 (4)　無限円筒　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部半径（keff≦0.95）の関係
（Pu 同位体組成 55:30:15、U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射）



Pu 富化度 (wt%)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部半径 (cm)			
5	16.3	16.8	18.1	19.8
10	13.5	13.9	14.9	16.1
20	11.8	12.1	13.0	13.9
30	11.2	11.5	12.3	13.2
50	10.5	10.8	11.5	12.3
100	9.7	9.9	10.6	11.3

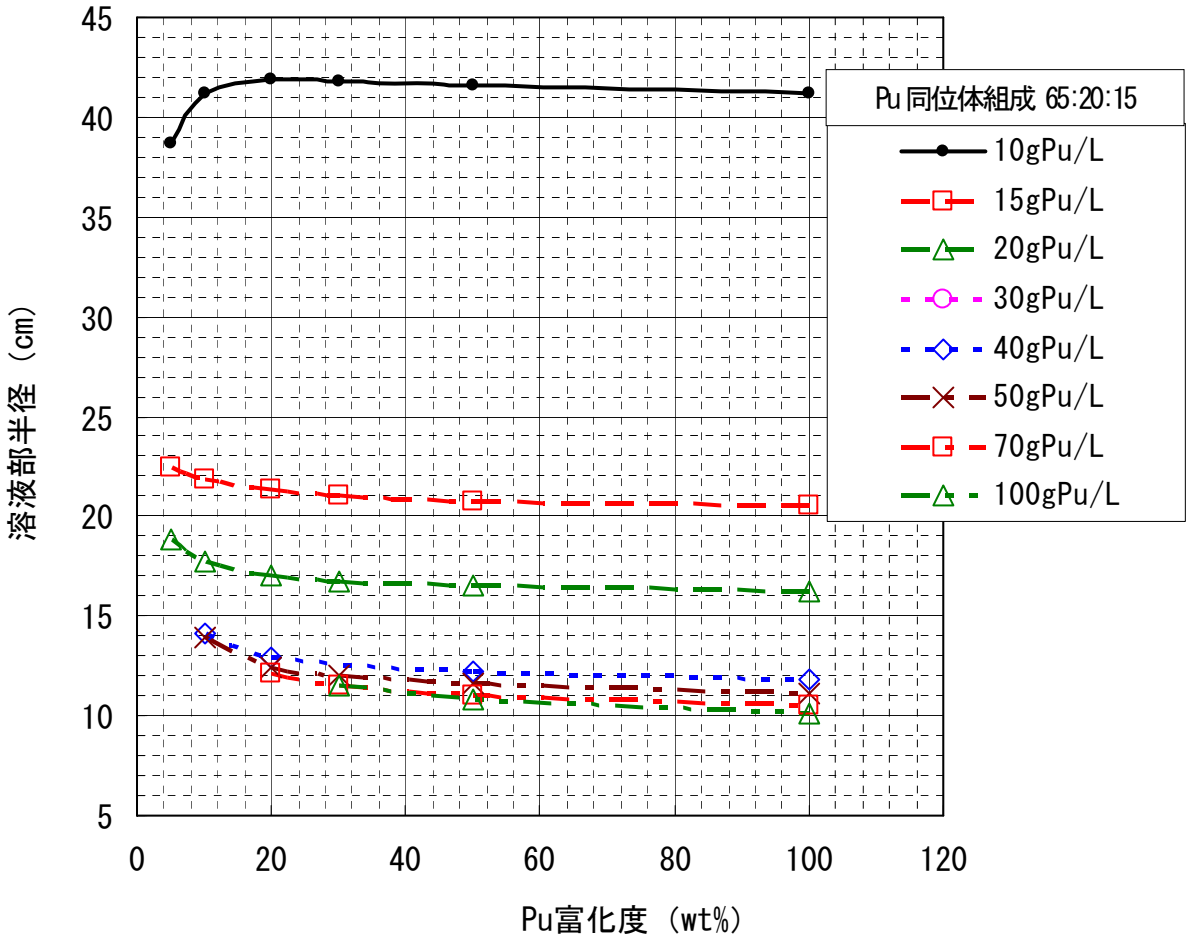
図 4.2.1.2-4　無限円筒　単一ユニット　Pu 富化度－全濃度安全溶液部半径(keff≦0.95)の関係
(U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射)



Pu 富化度 (wt%)	Pu 濃度 (g/L)							
	10	15	20	30	40	50	70	100
	溶液部半径 (cm)							
5	35.3	21.4	18.1	16.3				
10	36.9	20.8	17.0	14.5	13.7	13.5		
20	37.2	20.3	16.4	13.6	12.6	12.1	11.8	
30	37.1	20.0	16.1	13.3		11.6	11.2	11.2
50	36.9	19.8	15.9	13.0	11.8	11.2	10.7	10.5
100	36.6	19.5	15.6	12.7	11.5	10.9	10.2	9.8

（各 Pu 富化度について、Pu 濃度が 0g/L から溶液部半径が最小値となる濃度までの範囲をプロット）

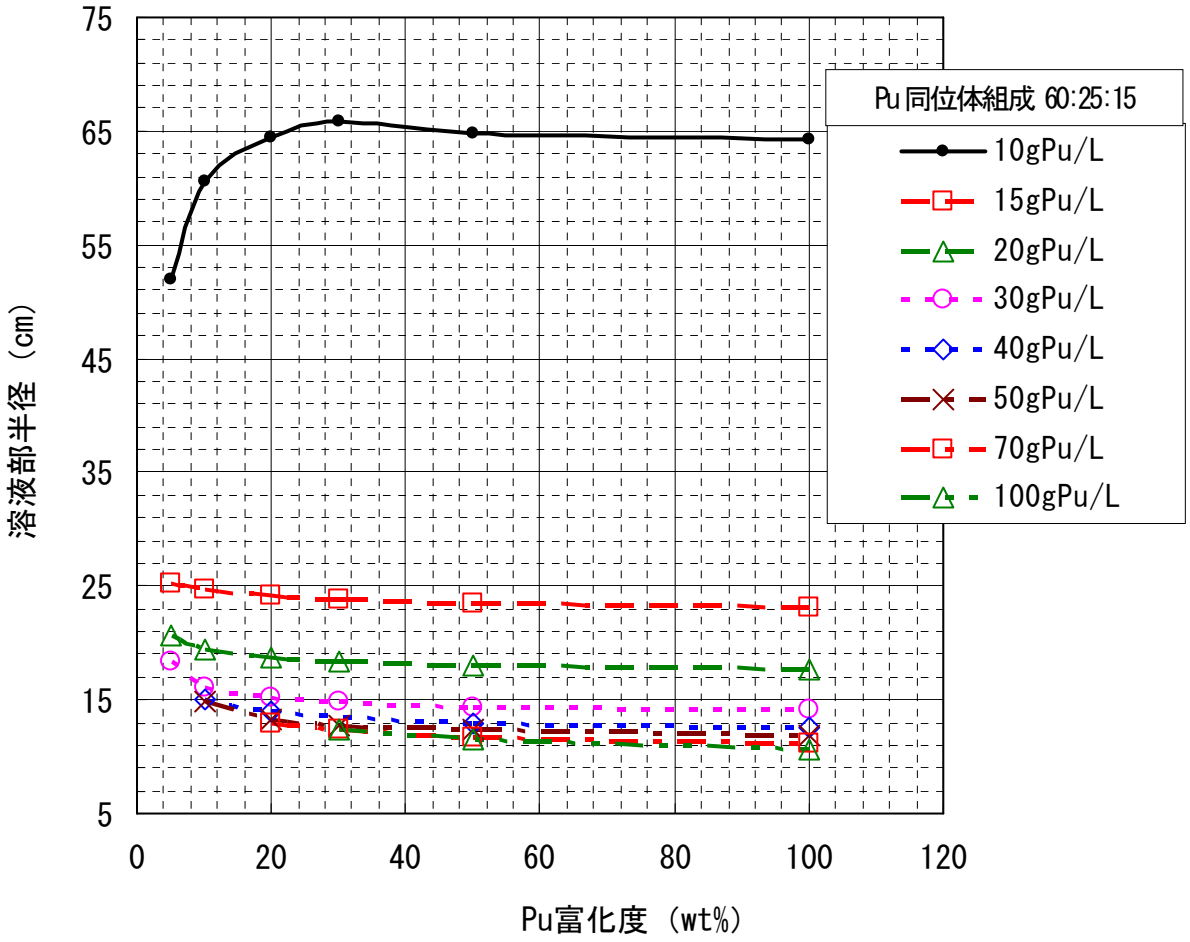
図 4.2.1.2-5 (1)　無限円筒　単一ユニット　Pu 富化度－溶液部半径（keff≦0.95）の関係
（Pu 同位体組成 71:17:12、U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射）



Pu 富化度 (wt%)	Pu 濃度 (g/L)							
	10	15	20	30	40	50	70	100
	溶液部半径 (cm)							
5	38.7	22.4	18.8	16.9				
10	41.2	21.8	17.7	14.9	14.1	13.9		
20	41.9	21.3	17.0	14.1	12.9	12.4	12.1	
30	41.8	21.0	16.7	13.7		12.0	11.5	11.5
50	41.6	20.7	16.5	13.4	12.2	11.6	11.0	10.8
100	41.2	20.5	16.2	13.1	11.8	11.1	10.5	10.1

（各 Pu 富化度について、Pu 濃度が 0g/L から溶液部半径が最小値となる濃度までの範囲をプロット）

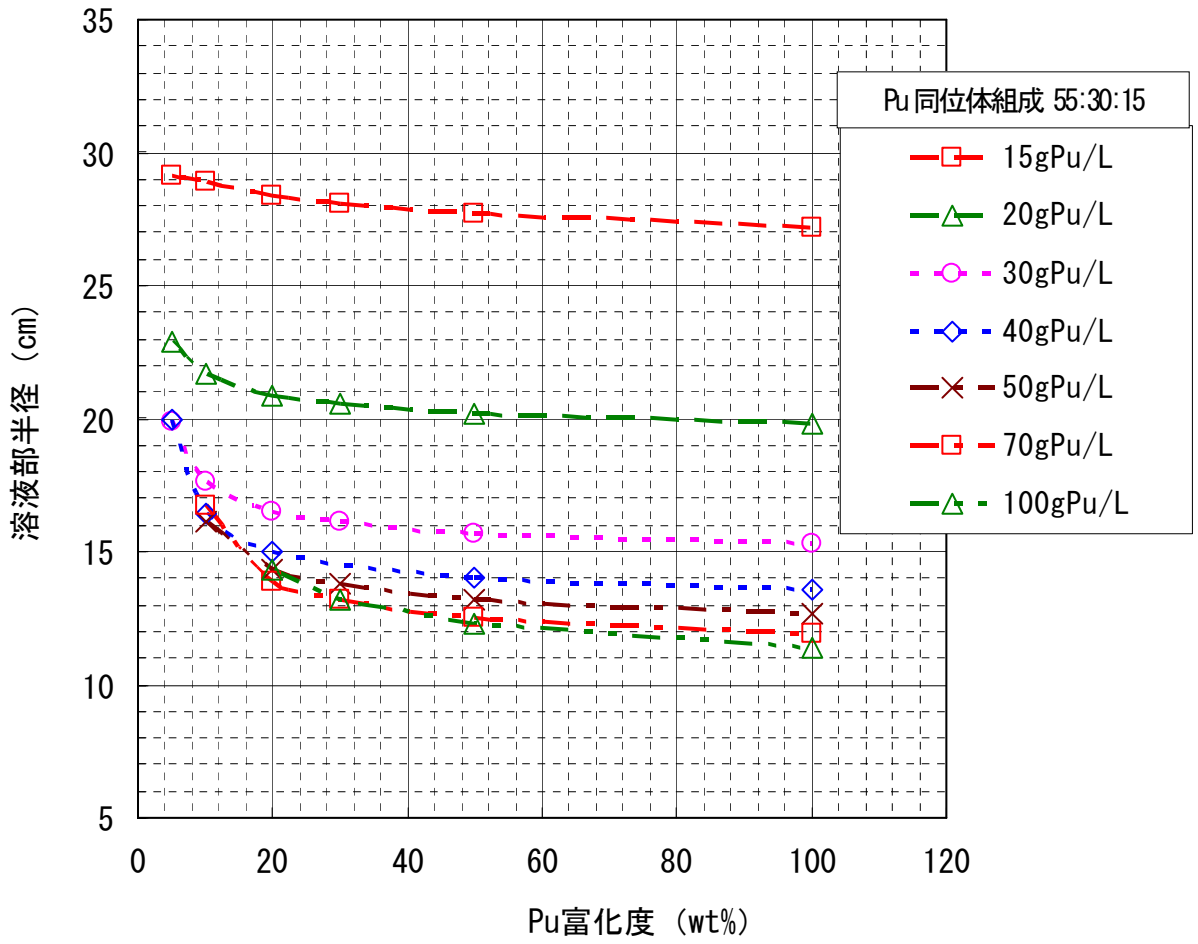
図 4.2.1.2-5 (2)　無限円筒　単一ユニット　Pu 富化度－溶液部半径（keff≦0.95）の関係
（Pu 同位体組成 65:20:15、U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射）



Pu 富化度 (wt%)	Pu 濃度 (g/L)							
	10	15	20	30	40	50	70	100
	溶液部半径 (cm)							
5	52.0	25.2	20.6	18.3				
10	60.5	24.7	19.4	16.1	15.1	14.9		
20	64.5	24.2	18.7	15.2	13.9	13.3	13.0	
30	65.9	23.9	18.4	14.8		12.8	12.3	12.3
50	64.8	23.5	18.1	14.4	13.0	12.3	11.7	11.5
100	64.2	23.2	17.7	14.1	12.6	11.9	11.1	10.7

（各 Pu 富化度について、Pu 濃度が 0g/L から溶液部半径が最小値となる濃度までの範囲をプロット）

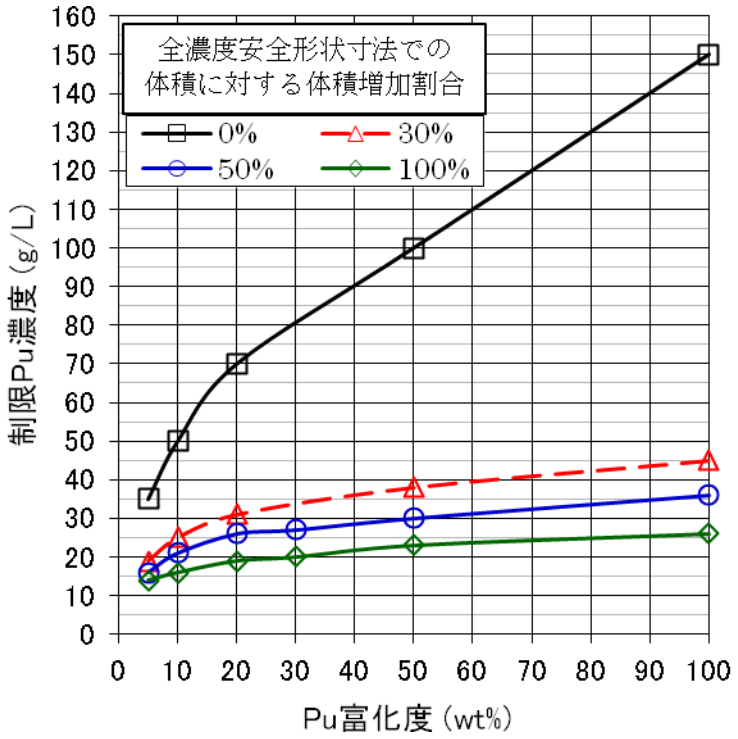
図 4.2.1.2-5 (3)　無限円筒　単一ユニット　Pu 富化度－溶液部半径（keff≦0.95）の関係
（Pu 同位体組成 60:25:15、U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射）



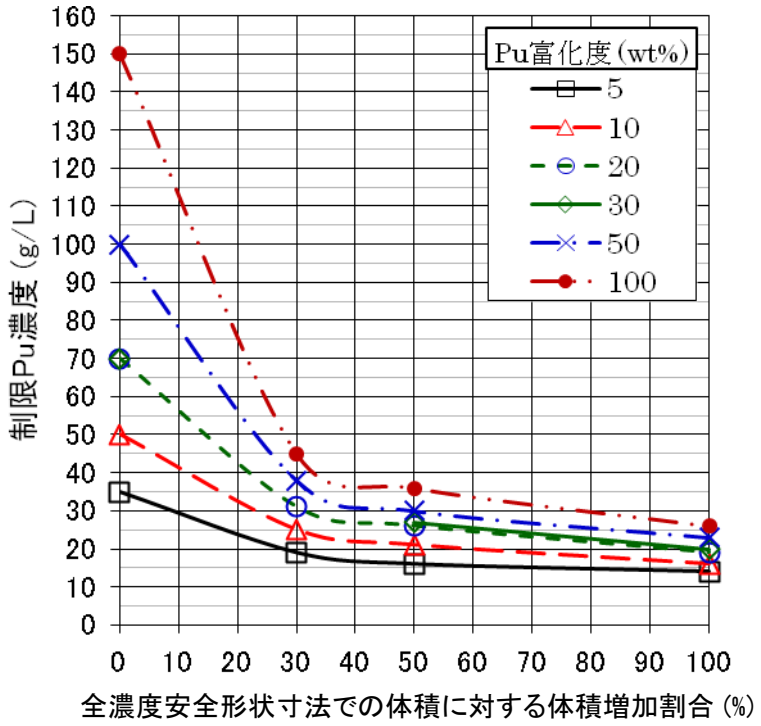
Pu 富化度 (wt%)	Pu 濃度 (g/L)							
	10	15	20	30	40	50	70	100
	溶液部半径 (cm)							
5	100.7	29.1	22.9	19.9	20.0			
10	∞	28.9	21.7	17.6	16.4	16.1	16.7	
20	∞	28.4	20.9	16.5	15.0	14.3	13.9	14.3
30	∞	28.1	20.6	16.1		13.8	13.2	13.2
50	∞	27.7	20.2	15.7	14.0	13.2	12.5	12.3
100	∞	27.2	19.8	15.3	13.6	12.7	11.9	11.4

（各 Pu 富化度について、Pu 濃度が 0g/L から溶液部半径が最小値となる濃度までの範囲をプロット）

図 4.2.1.2-5 (4)　無限円筒　単一ユニット　Pu 富化度－溶液部半径（keff≦0.95）の関係
（Pu 同位体組成 55:30:15、U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射）



(1) Pu 富化度 - 制限 Pu 濃度関係



(2) 体積増加割合 - 制限 Pu 濃度関係

図 4.2.1.2-6　無限円筒　単一ユニット　全濃度安全形状寸法での体積を所定の割合だけ増加させるのに必要な制限 Pu 濃度

（Pu 同位体組成　65:20:15、U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304　0.3cm 考慮、20cm 水反射）

4.2.2 円環槽液厚

無限高さの円環槽の計算は SCALE6 コードシステム／CSAS1 シーケンス（1 次元計算 XSDRNPM）、有限高さの円環の計算は CSAS5 シーケンス（3 次元モンテカルロ計算 KENO-V.a）により行った。

4.2.2.1 条件設定

円環槽の実効増倍係数 keff に影響する因子として、溶液厚以外に半径、高さ、円環槽の肉厚（内面、外面）、さらに中性子吸収材を用いる場合には、機器の内面あるいは外面から中性子吸収材までの空間の厚さ、が挙げられる。以下にこれらの因子の影響と条件設定について述べる。

(1) 半径

円環槽の溶液厚を一定にした条件で半径を増加させると keff は減少する [12)]。これは、機器の内外表面からの中性子の漏れが増加するとともに、内面間の中性子相互干渉が減少するためと考えられる。、従って、半径を小さく設定することが保守的となる。

ここでは最小容量約 1m^3 の円環槽を想定し、溶液厚み約 10 cm[7)]、高さ／直径比≒1 を想定すると、半径約 90cm（高さ約 180cm）となる。これを参考に、<u>溶液部内面半径を 100 cm とする</u>。高さは、以下の(3)にて設定する。

(2) SUS 構造材の肉厚

構造材の外側に十分な厚さの水反射体を配置する場合は、SUS は厚さ約 2 cm 以下の範囲では中性子吸収材として働き、肉厚を増加させると keff は減少する [2)]。一方、外側に中性子吸収材を配置する場合は、中性子反射体としての効果が効いてくるので、肉厚を増加させると keff は増加する [2)]。従って、水反射体を配置する側の SUS 厚は薄く、中性子反射体を配置する側の SUS 厚は厚く設定することが保守的となる。

<u>水反射体側の SUS 厚は 0.3 cm とする</u>（4.2.1.1 (1）項参照)。中性子吸収材を配置する側の SUS 厚を設定するために、以下の条件で、SUS 厚に対する keff 及び溶液部厚の依存性を調べた結果を図 4.2.2.1-1 に示す。

SCALE6/CSAS5 シーケンス
溶液部内面半径 : 100 cm
高さ : 無限
溶液外側 : 0.3cm SUS304、20cm 水反射体
溶液内側 : SUS304 厚 パラメータ（1、2、3 cm）
: 中性子吸収材 0.05 cmCd+10 cm ポリエチレン（3.3 (3)項参照）
Cd－SUS 間距離 10cm
Pu 組成 : Pu 富化度 20wt%、同位体組成 65:20:15

図 4.2.2.1-1 の(1)より、SUS 厚 1cm の増加で keff は約 0.01～0.02 弱増加し、全濃度溶液部厚にすると約 0.5cm 減少している。過度に保守的にならないよう配慮し、以降の計算では<u>中子吸収材側の SUS 厚を 2 cm とする。</u>

(3) 高さ

高さを増加させると、内面間の中性子相互干渉が増加するので、keff は増加する。従って、高さを大きく設定することが保守的となる。上記(2)と同じ計算条件（ただし、中子吸収材側の SUS 厚は 2 cm）で、高さに対する keff の依存性を調べた結果を図 4.2.2.1-2 に示す。

溶液部内面直径 200 cm に対し 3 倍の高さの 600cm で keff 及び全濃度安全となる溶液部厚はほぼ飽和しており、また、無限高さの場合の全濃度安全溶液部厚（12.4cm）と高さ 400 cm の場合の全濃度安全溶液部厚がほぼ一致している（注：溶液部厚は 0.1 cm 単位で計算しており、モンテカルロ計算による統計誤差のため、0.1 cm のずれが生じる場合がある）。

以降の計算では、十分な高さとして、溶液部内面直径の 2 倍の 400 cm とする。

(4) 機器の内面あるいは外面から中性子吸収材までの空間の厚さ

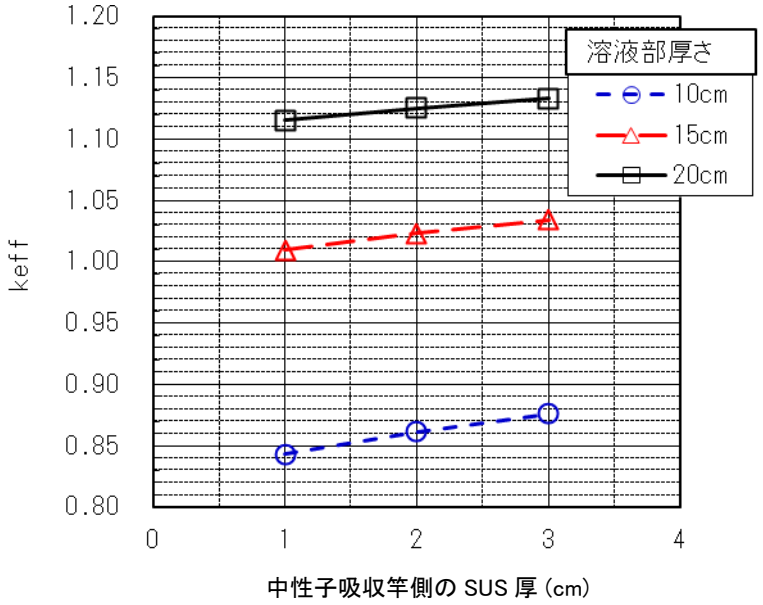
燃料部と内側の中性子吸収材との間隔が大きくなると、燃料部から中性子吸収材を見込む立体角が小さくなり、中性子が中性子吸収材に吸収されずにこの間隙を通過して燃料部に再び入る確率が大きくなるため keff は増加する。

一方、燃料部と外側の中性子吸収材との間隔が大きくなると、中性子吸収材から燃料部を見込む立体角が小さくなり、中性子吸収材で一部反射された中性子が燃料部に再び入る確率が小さくなるため keff は減少する。[12]

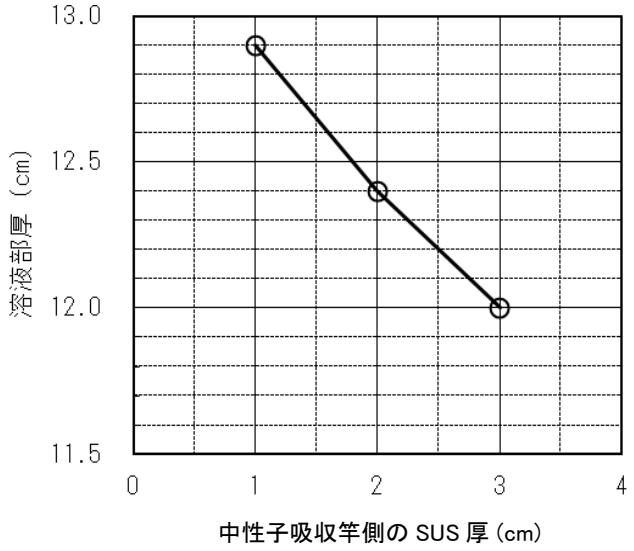
従って、中性子吸収材を内側に配置する場合には、燃料部との空間を大きくとることが、また、外側に配置する場合には、燃料部との空間を小さくとることが保守的となる。前記(2)項と同じ計算条件（ただし、中子吸収材側の SUS 厚 2 cm、高さ 400 cm）で、中性子吸収材－円環内面間隔に対する keff の依存性を調べた結果を図 4.2.2.1-3 に示す。

間隔 0～10cm の範囲では、keff への影響は（モンテカルロ計算による統計誤差のために部分的に凸凹が見られるが）ほぼ単調に増加していき、全濃度安全となる溶液部厚は単調に減少し（溶液部厚は 0.1 cm 単位で計算している）、間隔 0～10cm の範囲では 0.3 cm 減少する。

円環槽の製作施工上、あるいは、溶液の発熱によるポリエチレンへの熱的影響を避けるためにこの間隔を設けるものと考えられるが、以降の計算では、十分な中性子吸収材－円環内面の間隔として 10 cm とする。



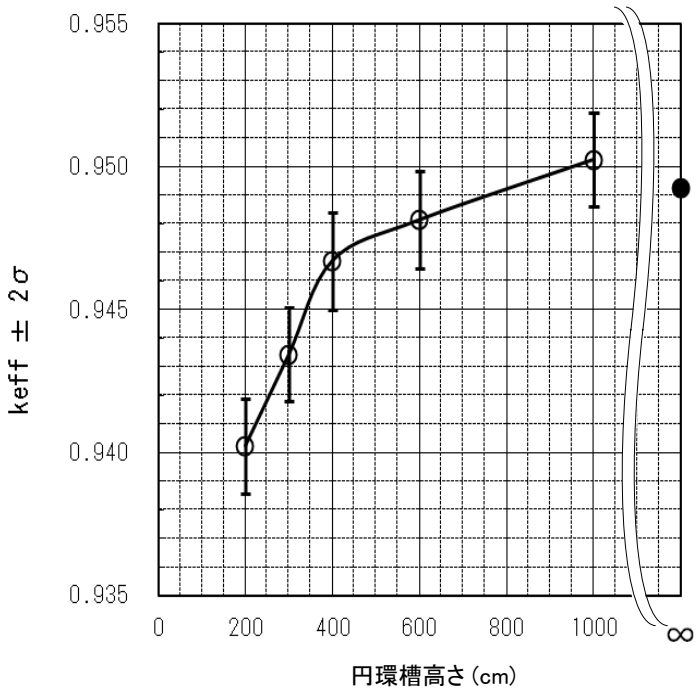
(1) keff への影響



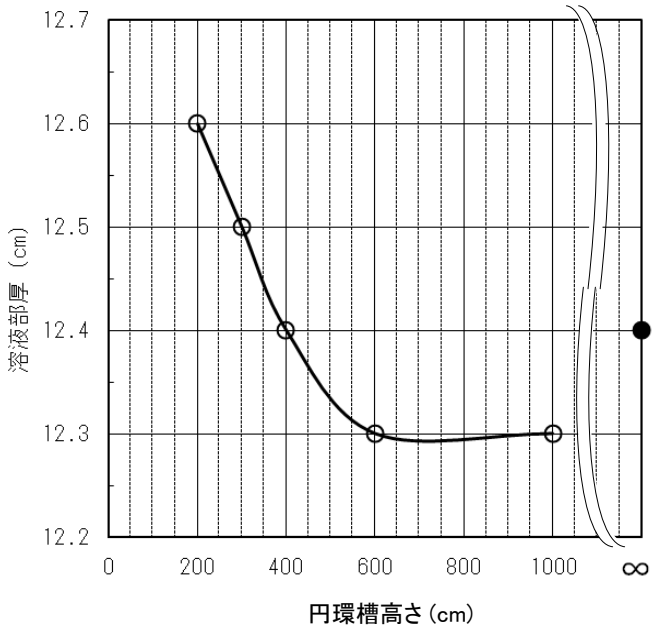
(2) 全濃度安全溶液部厚への影響

図 4.2.2.1-1　無限円環槽　単一ユニット　中性子吸収材側の SUS 厚の影響

Pu 富化度 20wt%、Pu 同位体組成 65:20:15、Pu 濃度 80g/L（最適濃度）
溶液部内側半径：100cm、
溶液外側：　SUS 肉厚 0.3cm、20cm 水反射
溶液内側：　SUS 肉厚（パラメータ）、0.05 cmCd+10 cm ポリエチレン、Cd-SUS 間距離　10cm



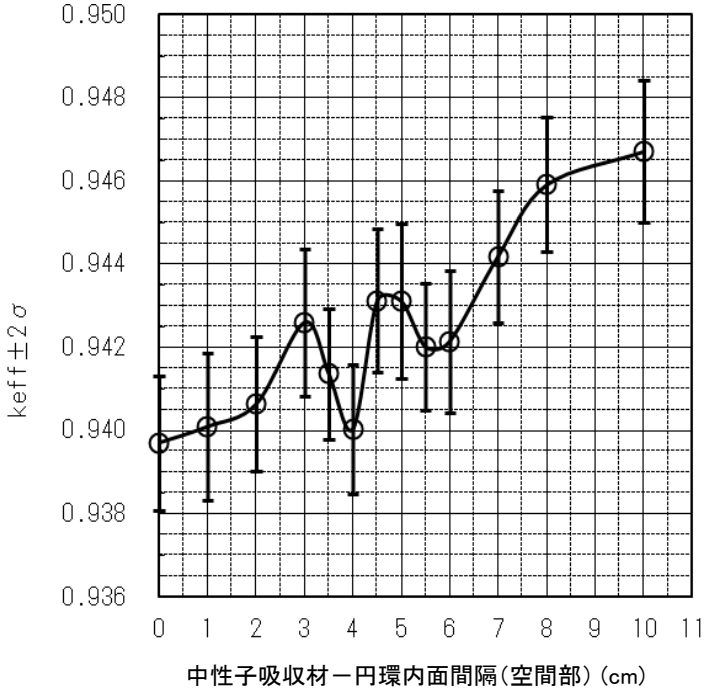
(1) keff への影響 （溶液部厚 12.4 cm の場合）



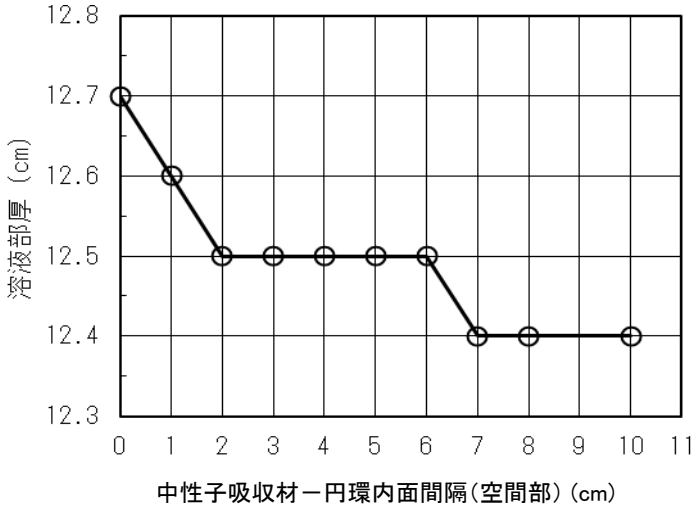
(2) 全濃度安全溶液部厚への影響

図 4.2.2.1-2 円環槽高さの影響

Pu 富化度 20wt%、Pu 同位体組成 65:20:15、Pu 濃度 80g/L（最適濃度）
溶液部内側半径:100cm、
溶液側面外側: SUS 肉厚 0.3cm、20cm 水反射
溶液側面内側: SUS 肉厚 2cm、0.05 cmCd+10 cm ポリエチレン、Cd-SUS 間距離 10cm
溶液上下面 : 20cm 水反射



(1) keff への影響



(2)　全濃度安全溶液部厚への影響

図 4.2.2.1-3　円環槽　単一ユニット　中性子吸収材-円環内面間隔の影響

Pu 富化度 20wt%、Pu 同位体組成 65:20:15、Pu 濃度 80g/L（最適濃度）
溶液部内側半径:100cm、円環高さ:　400cm、溶液部液厚:　12.4cm
溶液側面外側:　SUS 肉厚 0.3cm、20cm 水反射
溶液側面内側:　SUS 肉厚 2cm、0.05 cmCd+10 cm ポリエチレン
溶液上下面　:　20cm 水反射

4.2.2.2 単一ユニットの制限寸法

(1) 中性子吸収材に Cd＋ポリエチレンを使用した場合

(a) 未臨界寸法

前項までの条件設定に基づき、図 4.2.2.2-1 に示す計算モデルを用い、6 種類の Pu 富化度について、4 種類の Pu 同位体組成をパラメータとして、keff≦0.95 を満たす Pu 濃度－溶液部厚の関係を求めた結果を 図 4.2.2.2-2(1)～(6)に示す。同じデータについて、Pu 同位体組成毎に Pu 富化度をパラメータとしてプロットしたものを図 4.2.2.2-3(1)～(4)に示す。これらの結果から、Pu 富化度－全濃度安全溶液部厚の関係を求めたものを図 4.2.2.2-4 に示す。さらに、Pu 同位体組成毎に Pu 濃度をパラメータとして Pu 富化度－溶液部厚の関係を求めたものを図 4.2.2.2-5(1)～(4)に示す。

図 4.2.2.2-5 で、Pu 濃度 10g/L の場合に、最初の Pu 富化度 20～30wt%までは溶液部半径が増加していくのは、4.2.1.2 項の無限円筒の場合と同じで、その理由は 4.2.1.2 項で述べたとおりである。

これらの図から、以下のことが分かる。

- 計算範囲とした Pu 同位体組成の違いによる溶液部半径が最少となる最適 Pu 濃度の差はほとんどない （図 4.2.2.2-2(1)～(6)参照）
- Pu 富化度が増加すると、最適 Pu 濃度は増加していく （図 4.2.2.2-3(1)～(4)参照）

(b) 全濃度安全形状寸法から Pu 富化度または Pu 濃度を制限することによる体積増加割合

4.2.1.2 項の(2)で検討と同様に、Pu 富化度または Pu 濃度を管理することで寸法制限を緩和し槽の体積を増加させようとする場合の効果について検討した。

図 4.2.2.2-4 より、Pu 富化度 100%（Pu 溶液）の全濃度安全寸法で定まる槽の体積を、Pu 富化度を制限することにより所定の割合だけ増加させるためには、Pu 富化度をいくらまで制限すればよいかについて読み取ると、Pu 同位体組成に関わらず、以下の値となる。

体積増加割合	制限 Pu 富化度
0 %	100 wt% (基準)
30 %	約 20 wt%
50 %	約 10 wt%
100 %	約 5 wt%

図 4.2.2.2-2 あるいは図 4.2.2.2-3 から、全濃度安全形状寸法で定まる槽の体積を所定の割合だけ増加させるために、Pu 濃度をいくらに制限すればよいか、について読み取った。その関係について、Pu 富化度をパラメータにしたもの、体積増加割合をパラメータにしたものを図 4.2.2.2-6 の(1)(2)にそれぞれ示す。

この図は、Pu 同位体組成 65:20:15 の場合のものであるが、他の Pu 同位体組成（71:17:12、60:25:15、55:30:15）の場合の Pu 制限濃度との差は高々 3 g/L 程度であり、ほとんど変わらない。この図から、以下のことが分かる。

・ Pu 富化度が高い程、全濃度安全形状寸法での体積を所定の割合だけ増加させるために必要な Pu 制限濃度は高くなる。（図 4.2.2.2-6 の(1)参照）
・ この体積増加割合を 30%以上とするために必要な Pu 制限濃度は、Pu 富化度に依存して 17～40 g/L 以下に、100%（2 倍）にするためには 12～19 g/L 以下にしなければならない。（図 4.2.2.2-6 の(2)参照）

(2) 中性子吸収材にポリエチレンのみを使用した場合（Cd 無し）

3.3(3)(c)項に述べたように、円環内面の 10cm 厚ポリエチレン（対面合わせて 20cm 厚以上）だけでも十分な中性子吸収（隔離）効果があると考えられるため、本項(1)で行った計算を 0.05cm 厚の Cd を無くして（計算上は真空に置き換えて）行った結果を図 4.2.2.2-2(1)～(6)、図 4.2.2.2-3(1)～(4)、図 4.2.2.2-4 の数値データ表に( )で記載している。また、Cd が有る場合と無い場合での溶液部液厚の差を表 4.2.2.2-1 に示す。計算した範囲では、ポリエチレンだけでも溶液部液厚は約 0.2～0.6cm 減少する程度である。例えば、溶液部液厚が最も小さくなる Pu 富化度 100 wt% のときの約 10cm に対して、0.5cm の寸法減少は体積に換算すると（溶液部の半径に関わらず）約 5%の減少であり、この差は大きくない。従って、本検討のように十分なポリエチレン厚(10cm)を確保している場合、Cd を設置しなくても影響はほとんどないと考えられる。

なお、この寸法差の Pu 同位体組成への依存性はみられない。明確ではないが、Pu 濃度については、低濃度から最適濃度条件に近づくと、差が増加していくようにも見える。

表 4.2.2.2-1 では、Pu 富化度 50 wt%、Pu 濃度 10 g/L の時の差が 0.7、0.8 cm と他より幾分大きくなっているものがある（括弧で囲ったもの）。この2つについて、Cd がない場合の溶液部液厚と keff の関係を図 4.2.2.2-7 に示す。

図の(1)は Pu 同位体組成 65:20:15、Pu 濃度 10 g/L の場合のものである。溶液部液厚 50.2 cm のときに keff+3σ>0.95 となったので、keff+3σ≦0.95 を満たす最大溶液部液厚は 50.1cm とした。しかし、溶液部液厚 50.3～50.6 cm に対する keff+3σ は 0.95 未満となっており、50.2 cm の keff は他に比べて高めになっていることが分かる。keff+3σ の近似直線では、keff+3σ≦0.95 を満たす最大溶液部液厚は 50.5cm となり、Cd 有の場合の溶液部液厚 50.8cm との差は 0.3cm となる。

図の(2)は Pu 同位体組成 60:25:15、Pu 濃度 10 g/L の場合のものであるが、同様に、keff+3σ の近似直線で keff+3σ≦0.95 を満たす最大溶液部液厚は 80.6 cm となり、Cd 有の場合の溶液部液厚 80.6cm との差は 0.0cm となる。

このように、溶液部液厚の評価は、モンテカルロ計算の統計誤差により、数 mm の誤差があるものと考えるべきである。なお、4.2.1 項（無限円筒直径）、4.2.3 項（無限平板槽液厚）の評価では、1 次元計算コード XSDRNPM による決定論的計算で行っており、このような統計誤差は生じない。

(3) 空間水密度の影響

円筒、平板などの単一ユニットの臨界計算では、通常外側を水全反射条件（20cm 厚の水）とし、

評価体系に空間部がなく、空間水密度の影響を考慮する必要がない。円環槽の単一ユニットの場合は、通常、外側を水全反射条件、内側の空間は内側の中性子相互干渉効果を最大にするためボイドとして計算することが多い。これを「**基本条件**」ということにする。以下では、空間部の空間水密度の影響について考察する。ただし、外側空間も内側空間と同じ空間水密度として考える。

空間水密度の増加は以下の効果をもつ。

① 水の中性子吸収により円環内側の中性子相互干渉効果が弱まる
② 溶液部燃料に対する中性子反射効果が高まる
③ 空間水密度が小さい範囲では、中性子の減速効果が高まる

表 4.2.2.2-2 に、種々のケースの円環槽モデルの空間部の空間水密度の影響についての考察を示した。ここでは、外側空間、内側空間とも同じ空間水密度として考えている。

本検討では、基本的に表のケース D の条件で円環の溶液部厚を計算している。この場合、空間水密度が高くなると溶液部と内側の中性子吸収材（Cd）との隙間の幅に依存して、この空間の水による反射効果が高まり、keff が外側水全反射、内側空間ボイド条件よりも高くなる場合があり得る。この確認を行ったのが図 4.2.2.2-8 である。

この図より、空間水密度が 0.5 g/cm^3 以上になると keff が基本条件の値を超え、Pu 富化度 5～100 wt%の範囲でその差は 0.3～1 %Δk であり、Pu 富化度の増加に従い増加する傾向にある。従って、前項(1)(2)で示した円環槽の溶液部厚は、水没が想定される場合には適用できないが、霧、降雨程度の空間水密度（≦0.5 g/cm^3）では十分適用できる。

なお、図 4.2.2.2-8 の数値データ表に示したように、最適空間水密度（実質上水没状態）の条件で keff+3σ ≦0.95 を満たす円環槽の溶液部厚みは、基本条件の場合よりも 1、2 mm 減少する程度であり、その影響は小さい。

表 4.2.2.2-2 のケース D'（円環槽内側の Cd を無くし、ポリエチレンのみの場合）についての空間水密度の keff への影響を図 4.2.2.2-9 に示した。この場合も、空間水密度の増加とともに keff が増加していく傾向は同じであるが、前述の Cd 有りの場合と異なり、基本条件の keff を超えていない。ポリエチレンのみの場合は、水と似たような反射効果をもつと推定される。ポリエチレンと溶液部の空間（10cm）では局所的ではあるが円環内面近傍で中性子相互干渉がある。基本条件と比較すると、水没状態になったときは、内側の空間の反射効果の増加はそれほど大きくなく、中性子相互干渉が水により減少することの寄与によりkeffが基本条件のものより小さくなっているものと考えられる。従って、本検討条件においては、円環内側にポリエチレンのみの場合（Cd 無し）の溶液部液厚は、水没状態を想定しても適用可能である。

表 4.2.2.2-1　円環槽内側が 0.05cmCd+10cm ポリエチレンと 10cm ポリエチレンのみの場合の溶液部液厚（keff+3σ ≦0.95）の差

Pu 濃度（g/L）	Pu 富化度（wt%）					
	5	10	20	30	50	100
	溶液部厚の差（cm）((Cd 無)－(Cd 有))					

(1) Pu 同位体組成 71:17:12

10	0.3	0.3		0.2	0.3	0.0
15	0.2	0.2		0.2	0.2	0.3
30	0.5	0.3		0.3	0.3	0.3
35	0.4					
40	0.5	0.4				
50		0.4				
70		0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
100				0.4	0.5	0.4
150						0.4
200				0.6	0.5	0.5

(2) Pu 同位体組成 65:20:15

10	0.3	0.3		0.1	(0.7)	0.2
15	0.4	0.3		0.3	0.1	0.3
30	0.3	0.3		0.2	0.2	0.2
35	0.4					
40	0.5	0.3				
50		0.4				
70		0.5	0.4	0.3	0.4	0.4
100				0.5	0.4	0.3
200				0.6	0.4	0.4

(3) Pu 同位体組成 60:25:15

10	0.6	0.6		0.1	(0.8)	0.2
15	0.4	0.2		0.3	0.3	0.2
30	0.4	0.4		0.3	0.2	0.3
35	0.4					
40	0.5	0.4				
50		0.4				
70		0.6	0.4	0.4	0.4	0.4
100				0.4	0.4	0.4
140						0.3
200				0.5	0.5	0.5

(4) Pu 同位体組成 55:30:15

15	0.4	0.6		0.4	0.3	0.5
30	0.4	0.3		0.4	0.3	0.3
35	0.5					
40	0.5	0.4				
50		0.5				
70		0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
100				0.4	0.4	0.3
160						0.4
200				0.7	0.6	0.5

（計算条件）

Pu 富化度 パラメータ、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側： 2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd またはボイド）＋10cm ポリエチレン
溶液部外側： 0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

表 4.2.2.2-2　種々の円環槽モデルの内外空間の水密度の keff への影響に関する考察

円環槽内側の条件	空間水密度 d(g/cm^3)		
	0（ボイド）	0＜d＜1	1 （水没状態）
	内側空間ボイド、外側水全反射の場合を「**基本条件**」と称し、各ケース毎に、それぞれの空間水密度での基本条件に対する keff の変化について記載		
ケース A: 中性子吸収材等がなにもない場合	基本条件に対して外側の水反射体がない状態なので、基本条件よりも keff は減少する。	本文①～③の効果が複合的に働き、体系により、keff は水密度 0 から 1 の場合へと単調に変化する場合や、途中に極大値や極小値が現れる場合も考えられる。	外側は基本条件と同じ水全反射条件となる。内側の中性子相互干渉が遮断され、内側も水全反射状態になる。中性子相互干渉の寄与と水全反射の寄与の大小関係により、基本条件での中性子相互干渉効果の寄与が大きい体系（H/D（高さ／直径比）が大きく、軸方向への漏れが小さい場合）では keff が基本条件より小さくなり、基本条件での中性子相互干渉効果の寄与が小さい体系（H/D（高さ／直径比）が小さく、軸方向への漏れが大きい場合）では keff が基本条件より大きくなる場合があると考えられる。
ケース B: 中性子吸収材(Cd)が接している場合	同上	低い水密度のうちは中性子の減速効果により Cd の中性子吸収能力が高まり keff は減少し、さらに水密度が増加すると、水の中性子吸収による内側の中性子相互干渉の減少と外側の水反射効果の増加により keff は増加に転じる場合もあると考えられる。	外側は基本条件と同じ水全反射条件となる。内側も水全反射状態になるが、Cd が間にあることにより、水反射体で反射した中性子は Cd に吸収されてしまうので反射効果は小さい。内側の中性子相互干渉が遮断される分だけ基本条件より keff は減少するが、ケース A よりも Cd により内側の中性子相互干渉効果が弱くなっているので、その差はケース A のときよりも小さいものと予想される。
ケース C: 中性子吸収材(Cd)+減速材(ポリエチレン)が接している場合	同上	Cd＋ポリエチレンにより内側の中性子相互干渉は遮断されているので、内側の中性子相互干渉に対する空間水密度の影響はなくなる。外側の水反射効果が水密度とともに増加してくるので、keff は増加していくと考えられる。	外側は基本条件と同じ水全反射条件となる。内側が水全反射状態になっても、間に Cd＋ポリエチレンがあることにより、水反射体の効果はなくなる。従って、keff は基本条件とほぼ同じになると予想される。
ケース C': ポリエチレンのみが接している場合	同上	ポリエチレンのみでも、内側の中性子相互干渉を遮断する十分な厚みがある場合は、上記と同じ	同左
ケース D: 中性子吸収材(Cd)+減速材(ポリエチレン)が離れて配置してある場合	同上	内側の Cd＋ポリエチレンと燃料溶液との間の空間が水で満たされていくに従い、この空間を通じた中性子相互干渉の減少と水反射効果の増加の効果が競合するが、空間の幅が狭ければ前者の寄与は小さく、両側の水反射効果の増加により keff は増加していくものと考えられる。	外側は基本条件と同じ水全反射条件となる。内側は Cd＋ポリエチレンと燃料溶液との間の空間が水で満たされることにより、中性子の水反射効果が大きくなり、keff は基本条件より大きくなると考えられる。
ケース D': ポリエチレンのみが離れて配置してある場合	同上	ポリエチレンは水と似たような反射効果をもつとすれば、ポリエチレンと燃料溶液との間の空間が水で満たされていくに従い、内側の反射効果の増加の寄与は大きくはなく、外側の水反射効果の増加により keff は増加していくものと考えられる。	外側は基本条件と同じ水全反射条件となる。内側はポリエチレンと燃料溶液との間の空間が水で満たされることによる反射効果の増加の寄与は大きくはなく、空間を通じた中性子相互干渉の減少により、keff は基本条件より小さくなると考えられる。

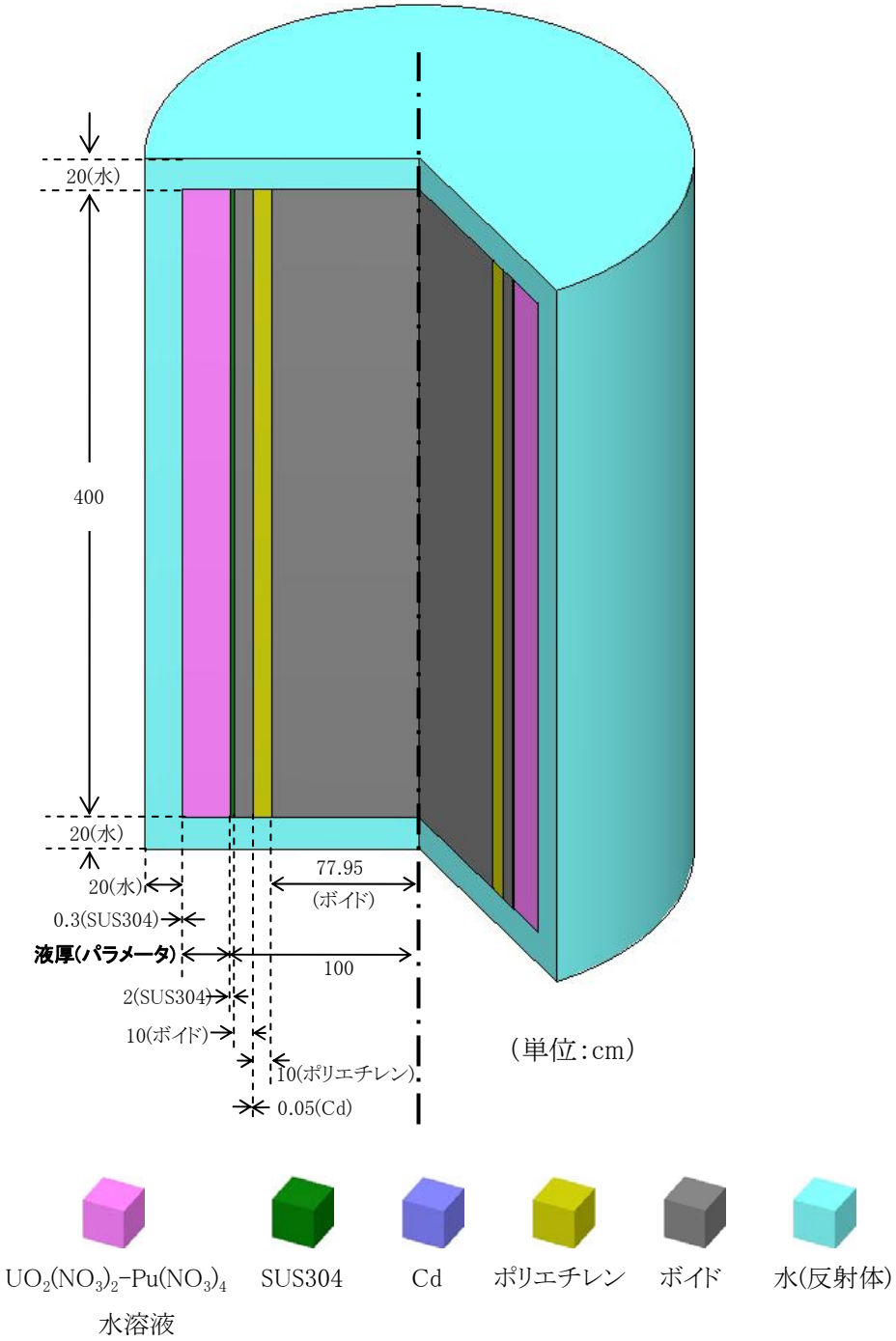
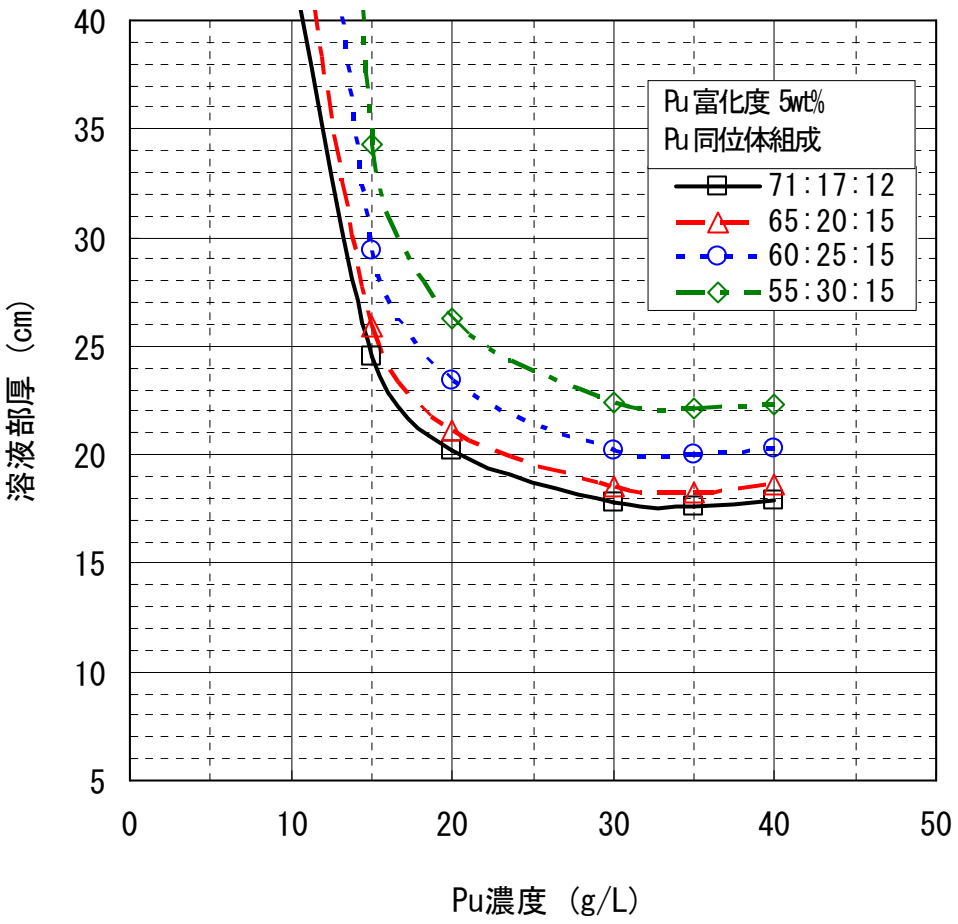


図 4.2.2.2-1　円環槽　単一ユニット　計算モデル

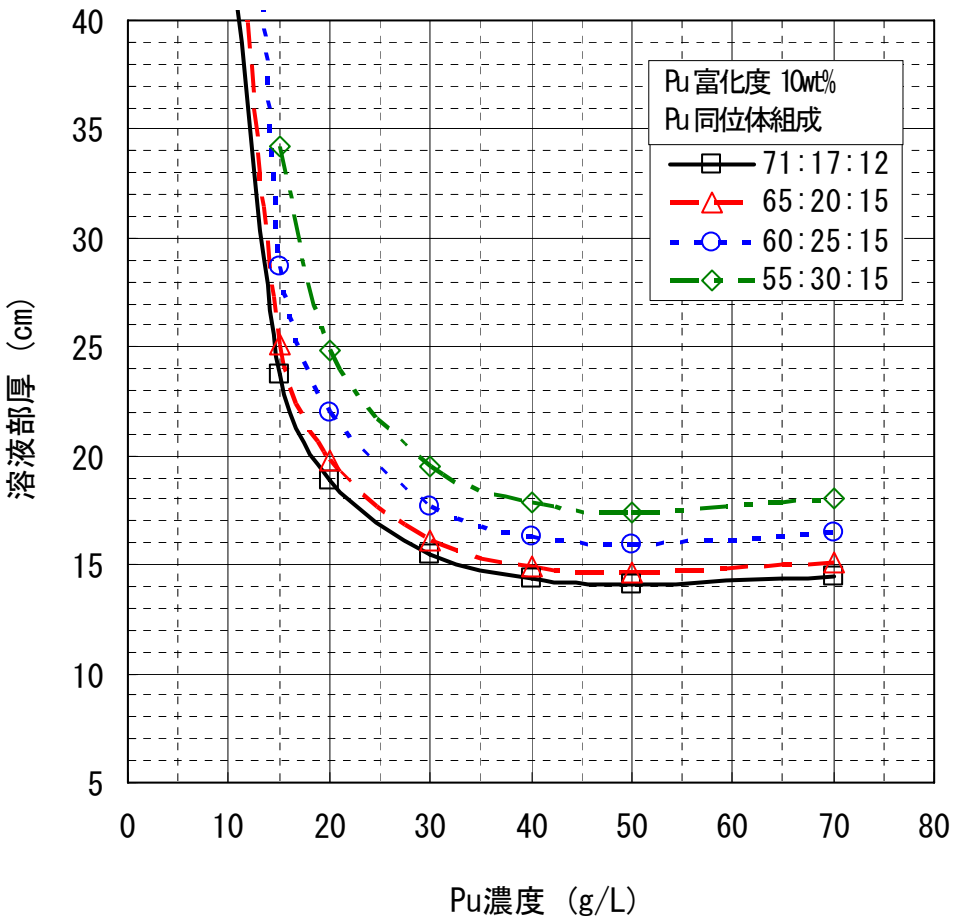


Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部厚（cm）			
10	42.6 (42.3)	46.9 (46.6)	64.5 (63.9)	122.7(123.0)
15	24.5 (24.3)	25.9 (25.5)	29.4 (29.0)	34.3 (33.9)
20	20.2	21.1	23.4	26.3
30	17.8 (17.3)	18.5 (18.2)	20.2 (19.8)	22.4 (22.0)
35	**17.6 (17.2)**	**18.3 (17.9)**	**20.0 (19.6)**	**22.1 (21.6)**
40	17.9 (17.4)	18.6 (18.1)	20.3 (19.8)	22.3 (21.8)

（太字は最小値、( )内は Cd をボイドに置き換えた場合）

図 4.2.2.2-2 (1)　円環槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff+3σ ≦0.95）の関係

Pu 富化度 5wt%、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

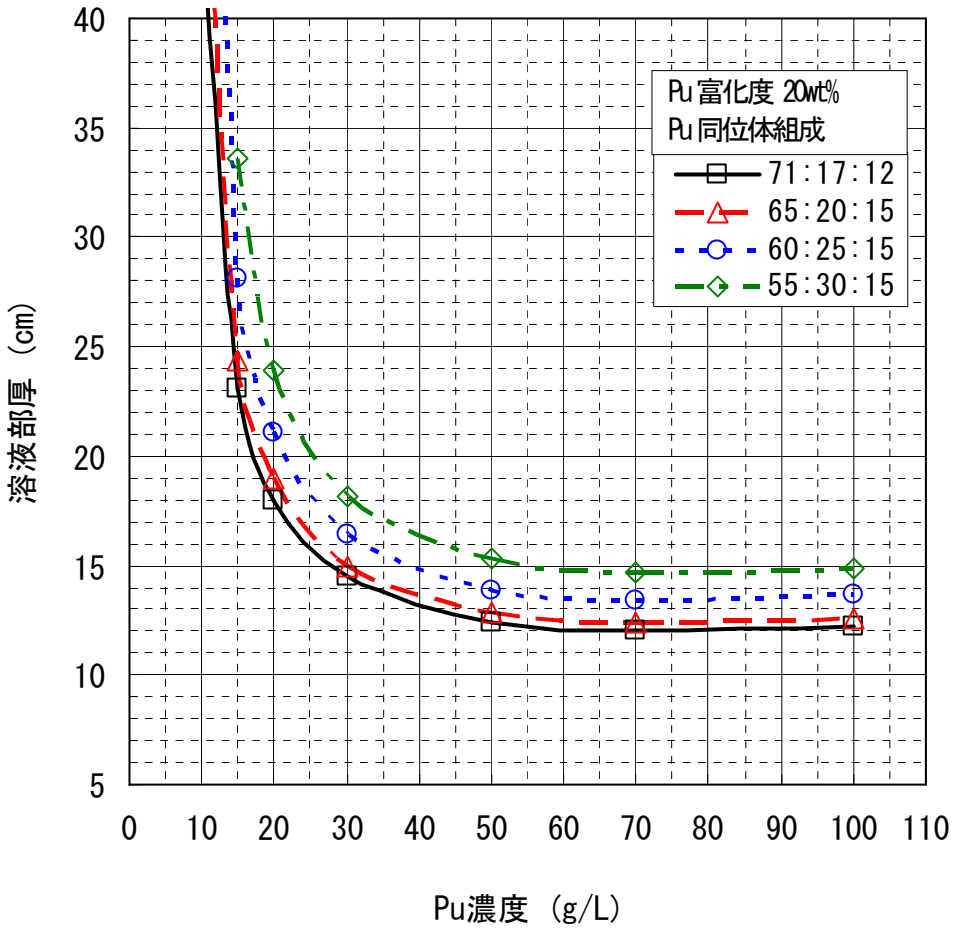


Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部厚（cm）			
10	44.6 (44.3)	50.1 (49.8)	74.9 (74.3)	∞
15	23.7 (23.5)	25.1 (24.8)	28.7 (28.5)	34.2 (33.6)
20	18.9	19.8	22.0	24.8
30	15.5 (15.2)	16.1 (15.8)	17.7 (17.3)	19.5 (19.2)
40	14.4 (14.0)	14.9 (14.6)	16.3 (15.9)	17.9 (17.5)
50	**14.1 (13.7)**	**14.6 (14.2)**	**15.9 (15.5)**	**17.4 (16.9)**
70	14.5 (14.1)	15.1 (14.6)	16.5 (15.9)	18.0 (17.5)

（太字は最小値、( )内は Cd をボイドに置き換えた場合）

図 4.2.2.2-2 (2)　円環槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff+3 σ ≦0.95）の関係

Pu 富化度 10wt%、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

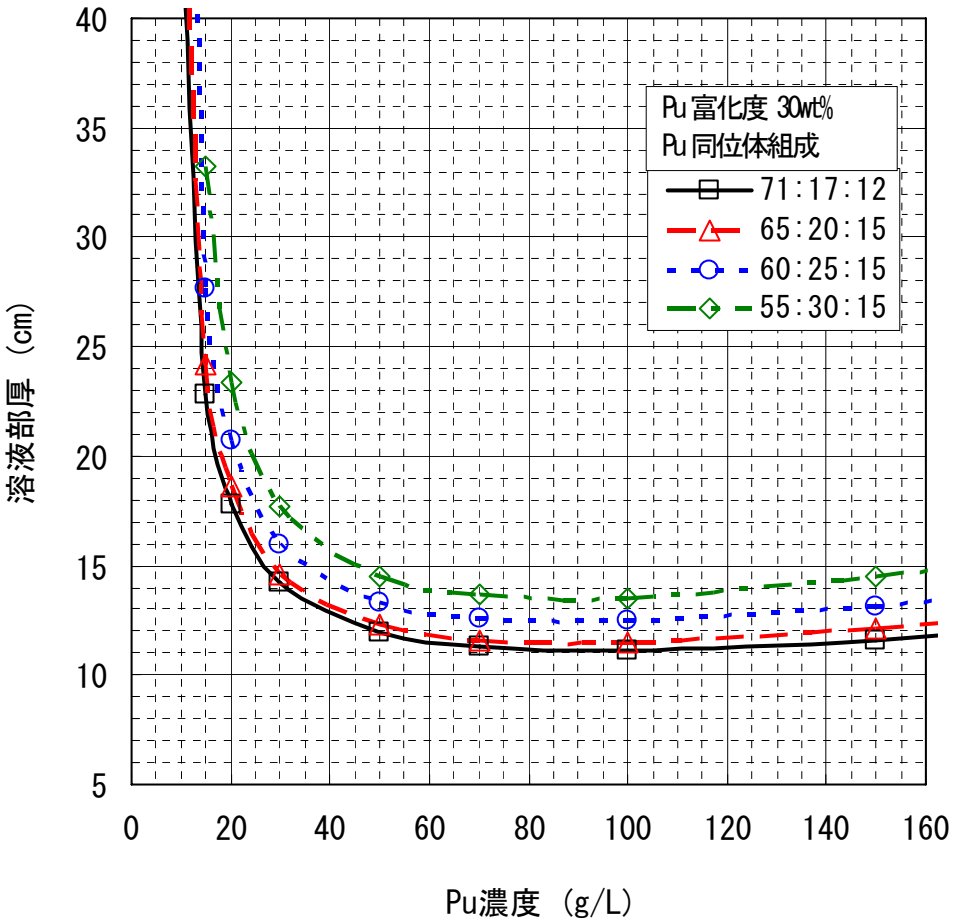


Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部厚（cm）			
10	45.0	50.9	80.7	∞
15	23.1	24.4	28.1	33.6
20	18.0	19.0	21.1	23.9
30	14.5	15.0	16.4	18.2
50	12.4	12.9	13.9	15.3
70	**12.0 (11.6)**	**12.4 (12.0)**	**13.4 (13.0)**	**14.7 (14.2)**
100	12.2	12.6	13.7	14.9

（太字は最小値、( )内は Cd をボイドに置き換えた場合）

図 4.2.2.2-2 (3)　円環槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff+3σ ≦0.95）の関係

Pu 富化度 20wt%、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

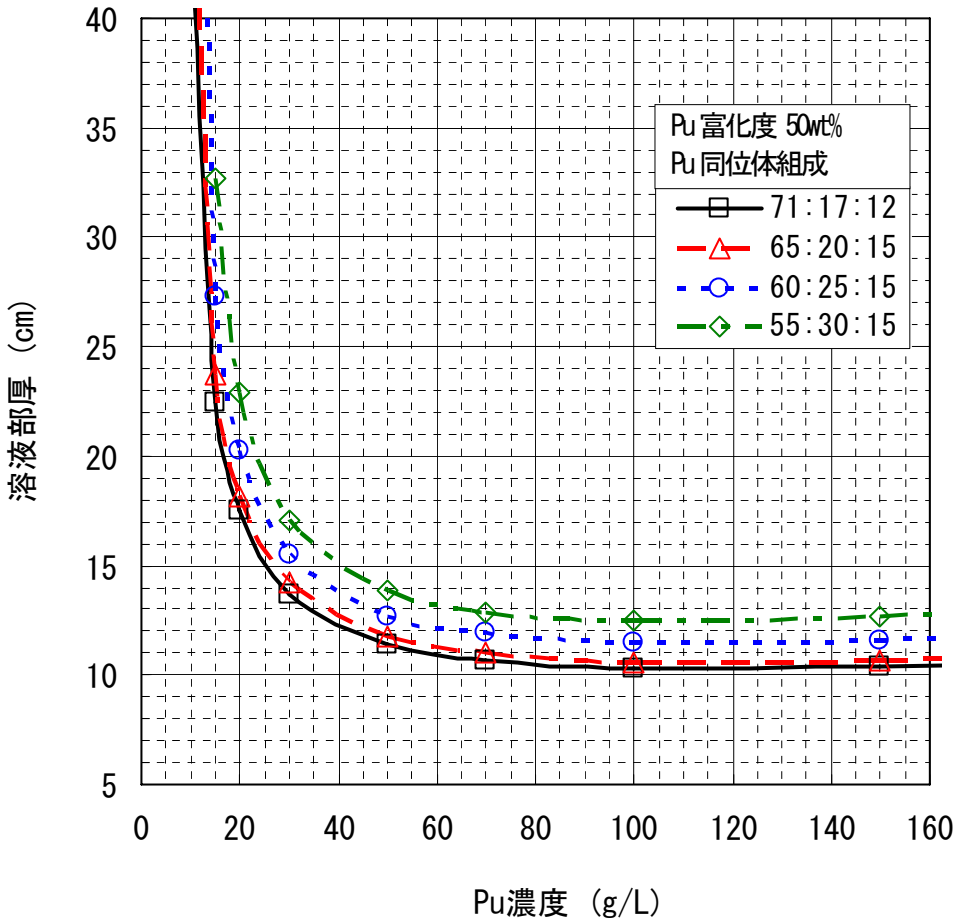


Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部厚（cm）			
10	44.9 (44.7)	50.8 (50.7)	80.8 (80.7)	∞
15	22.8 (22.6)	24.2 (23.9)	27.7 (27.4)	33.2 (32.8)
20	17.8	18.6	20.7	23.4
30	14.2 (13.9)	14.6 (14.4)	16.0 (15.7)	17.7 (17.3)
50	11.9	12.3	13.3	14.5
70	11.3 (10.9)	11.6 (11.3)	12.6 (12.2)	13.7 (13.3)
100	**11.1 (10.7)**	**11.5 (11.0)**	**12.5 (12.1)**	**13.5 (13.1)**
150	11.6	12.1	13.1	14.5
200	12.5 (11.9)	13.0 (12.4)	14.2 (13.7)	15.8 (15.1)

（太字は最小値、( )内は Cd をボイドに置き換えた場合）

図 4.2.2.2-2 (4)　円環槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff+3 σ ≦0.95）の関係

Pu 富化度 30wt%、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：　2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：　0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

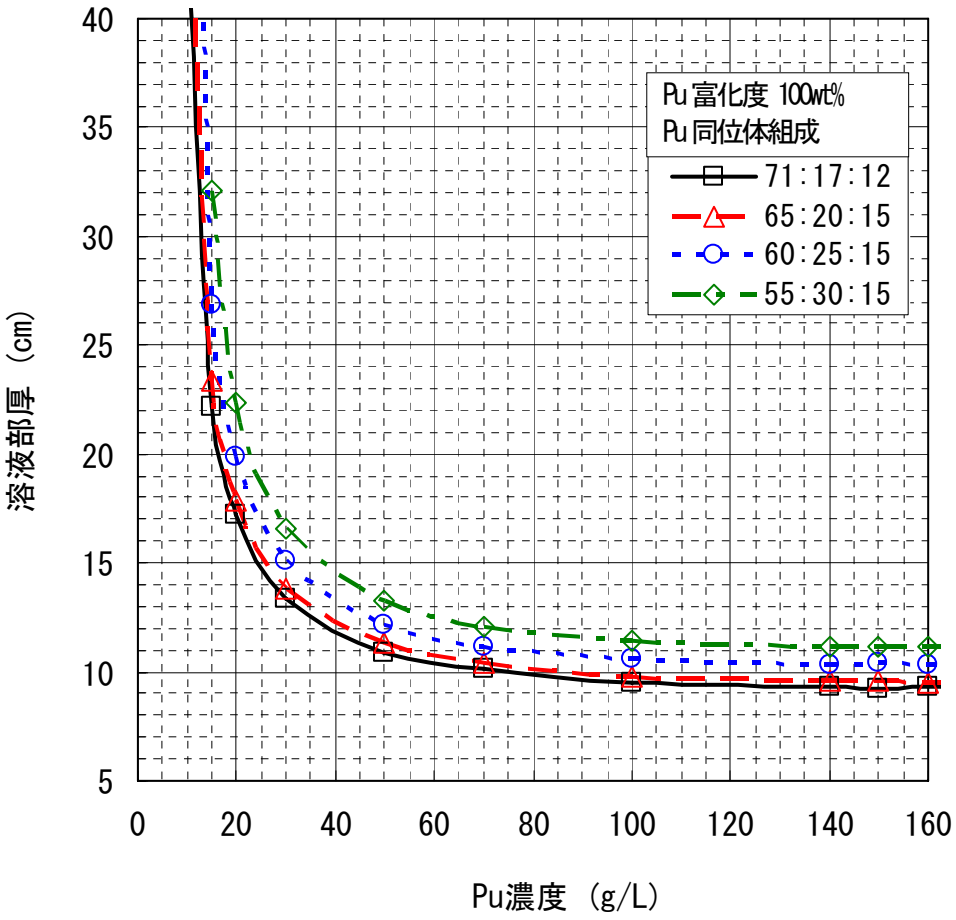


Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部厚（cm）			
10	44.6 (44.3)	50.8 (50.1)	80.6 (79.8)	∞
15	22.5 (22.3)	23.7 (23.6)	27.3 (27.0)	32.7 (32.4)
20	17.5	18.2	20.3	22.9
30	13.7 (13.4)	14.2 (14.0)	15.5 (15.3)	17.1 (16.8)
50	11.4	11.8	12.7	13.9
70	10.7 (10.3)	11.0 (10.6)	11.9 (11.5)	12.9 (12.5)
100	**10.3 (9.8)**	**10.6 (10.2)**	**11.5 (11.1)**	**12.5 (12.1)**
150	10.4	10.7	11.6	12.7
200	10.7 (10.2)	11.0 (10.6)	12.1 (11.6)	13.3 (12.7)

（太字は最小値、( )内は Cd をボイドに置き換えた場合）

図 4.2.2.2-2 (5)　円環槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff+3 σ ≦0.95）の関係

Pu 富化度 50wt%、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

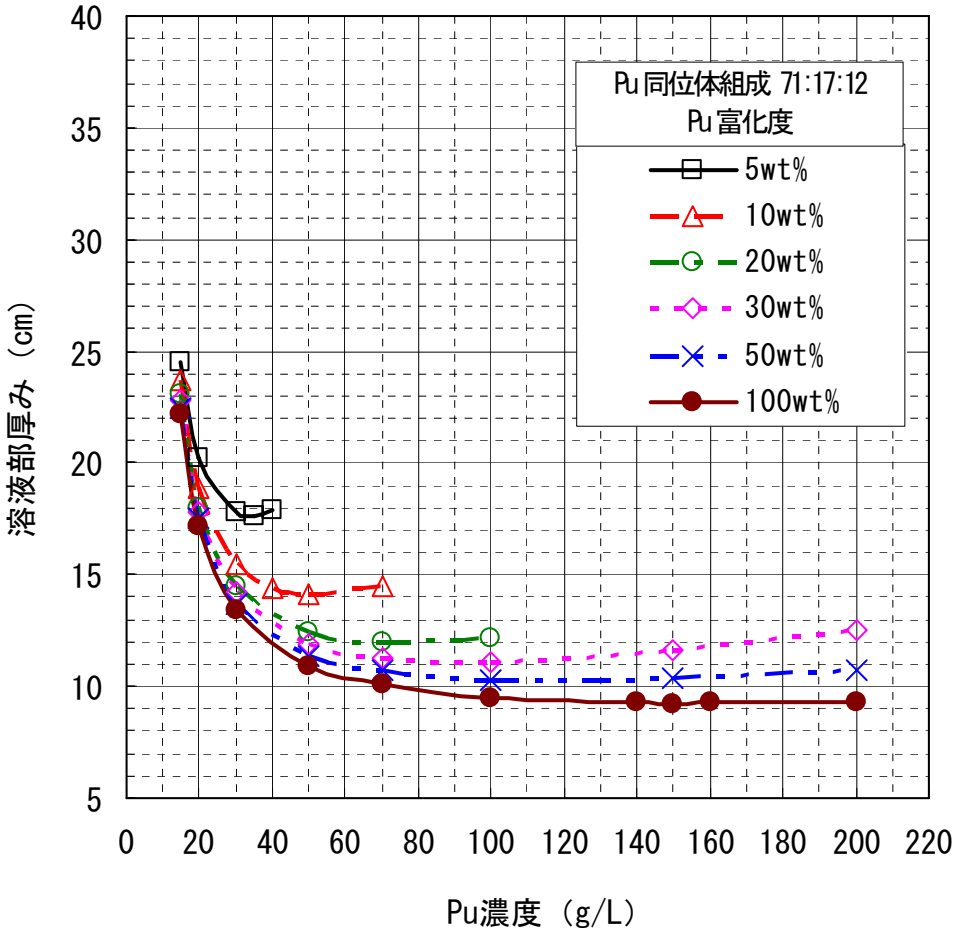


Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部厚（cm）			
10	44.1 (44.1)	50.1 (49.9)	79.5 (79.3)	∞
15	22.2 (21.9)	23.4 (23.1)	26.9 (26.7)	32.1 (31.6)
20	17.2	17.9	19.9	22.4
30	13.4 (13.1)	13.8 (13.6)	15.1 (14.8)	16.6 (16.3)
50	10.9	11.3	12.2	13.3
70	10.1 (9.7)	10.4 (10.0)	11.2 (10.8)	12.1 (11.8)
100	9.5 (9.1)	9.8 (9.5)	10.6 (10.2)	11.4 (11.1)
140	9.3	9.6	10.3	**11.2**
150	**9.2 (8.8)**	9.6	10.4	**11.2**
160	9.3	**9.5**	**10.3 (10.0)**	**11.2 (10.8)**
200	9.3 (8.8)	9.5 (9.1)	10.4 (9.9)	11.3 (10.8)

（太字は最小値、( )内は Cd をボイドに置き換えた場合）

図 4.2.2.2-2 (6)　円環槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff+3σ ≦0.95）の関係

Pu 富化度 100wt%、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

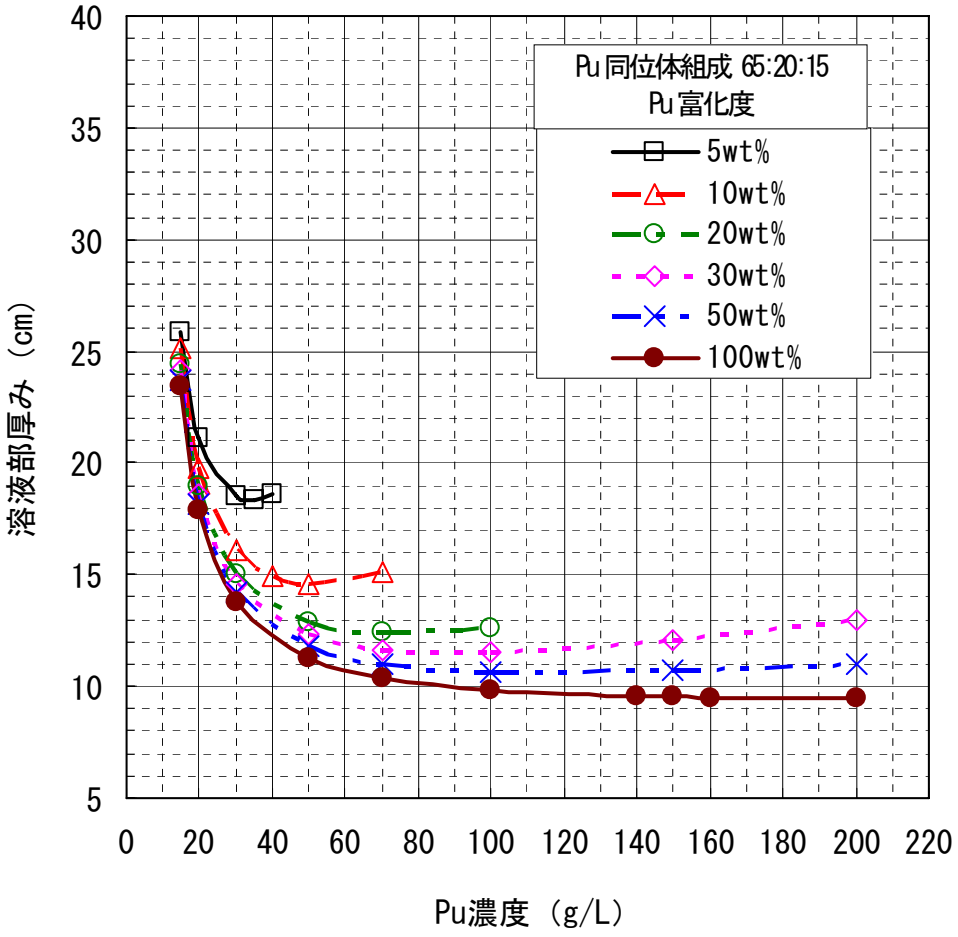


Pu 濃度 (g/L)	Pu 富化度（wt%）					
	5	10	20	30	50	100
	溶液部厚（cm）					
10	42.6 (42.3)	44.6 (44.3)	45.0	44.9 (44.7)	44.6 (44.3)	44.1 (44.1)
15	24.5 (24.3)	23.7 (23.5)	23.1	22.8 (22.6)	22.5 (22.3)	22.2 (21.9)
20	20.2	18.9	18.0	17.8	17.5	17.2
30	17.8 (17.3)	15.5 (15.2)	14.5	14.2 (13.9)	13.7 (13.4)	13.4 (13.1)
35	**17.6 (17.2)**					
40	17.9 (17.4)	14.4 (14.0)				
50		**14.1 (13.7)**	12.4	11.9	11.4	10.9
70		14.5 (14.1)	**12.0 (11.6)**	11.3 (10.9)	10.7 (10.3)	10.1 (9.7)
100			12.2	**11.1 (10.7)**	**10.3 (9.8)**	9.5 (9.1)
140						9.3
150				11.6	10.4	**9.2 (8.8)**
160						9.3
200				12.5 (11.9)	10.7 (10.2)	9.3 (8.8)

（太字は最小値、( )内は Cd をボイドに置き換えた場合）

図 4.2.2.2-3 (1)　円環槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff+3 σ ≦0.95）の関係

Pu 同位体組成　71:17:12、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：　2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：　0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

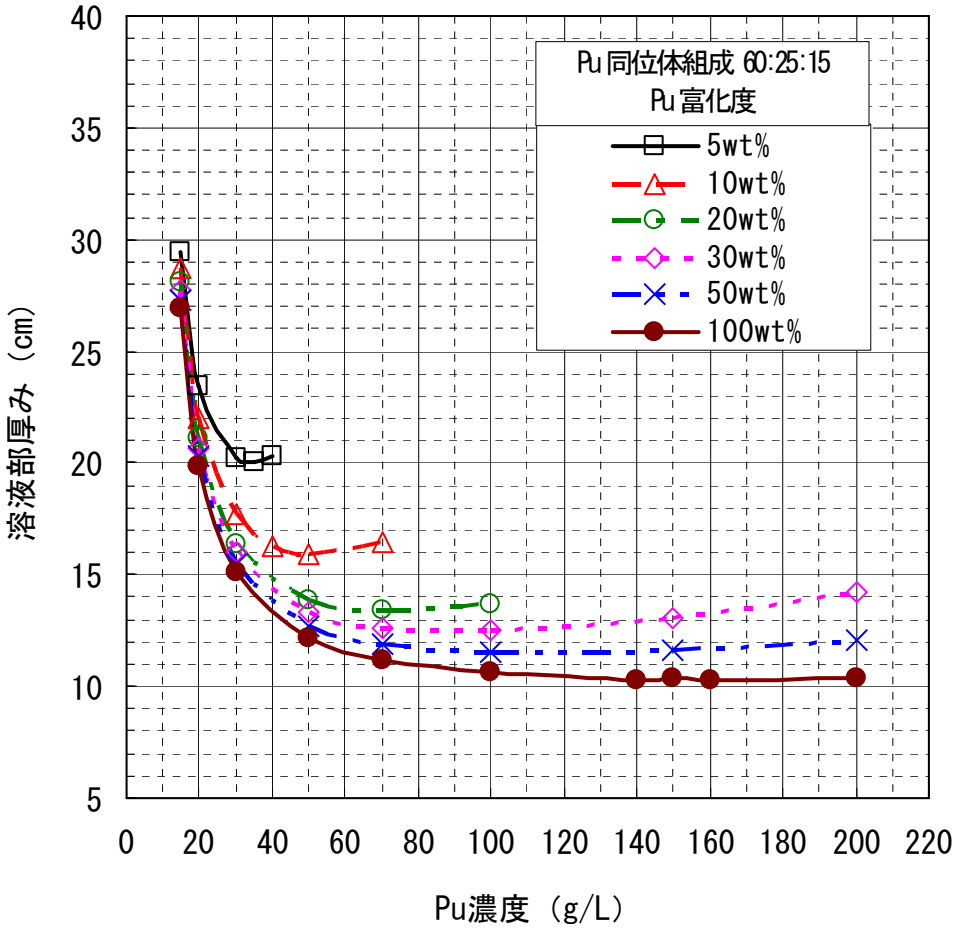


Pu 濃度 (g/L)	Pu 富化度（wt%）					
	5	10	20	30	50	100
	溶液部厚（cm）					
10	46.9 (46.6)	50.1 (49.8)	50.9	50.8 (50.7)	50.8 (50.1)	50.1 (49.9)
15	25.9 (25.5)	25.1 (24.8)	24.4	24.2 (23.9)	23.7 (23.6)	23.4 (23.1)
20	21.1	19.8	19.0	18.6	18.2	17.9
30	18.5 (18.2)	16.1 (15.8)	15.0	14.6 (14.4)	14.2 (14.0)	13.8 (13.6)
35	**18.3 (17.9)**					
40	18.6 (18.1)	14.9 (14.6)				
50		**14.6 (14.2)**	12.9	12.3	11.8	11.3
70		15.1 (14.6)	**12.4 (12.0)**	11.6 (11.3)	11.0 (10.6)	10.4 (10.0)
100			12.6	**11.5 (11.0)**	**10.6 (10.2)**	9.8 (9.5)
140						9.6
150				12.1	10.7	9.6
160						**9.5**
200				13.0 (12.4)	11.0 (10.6)	**9.5 (9.1)**

（太字は最小値、( )内は Cd をボイドに置き換えた場合）

図 4.2.2.2-3 (2)　円環槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff+3σ ≦0.95）の関係

Pu 同位体組成　65:20:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：　2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：　0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

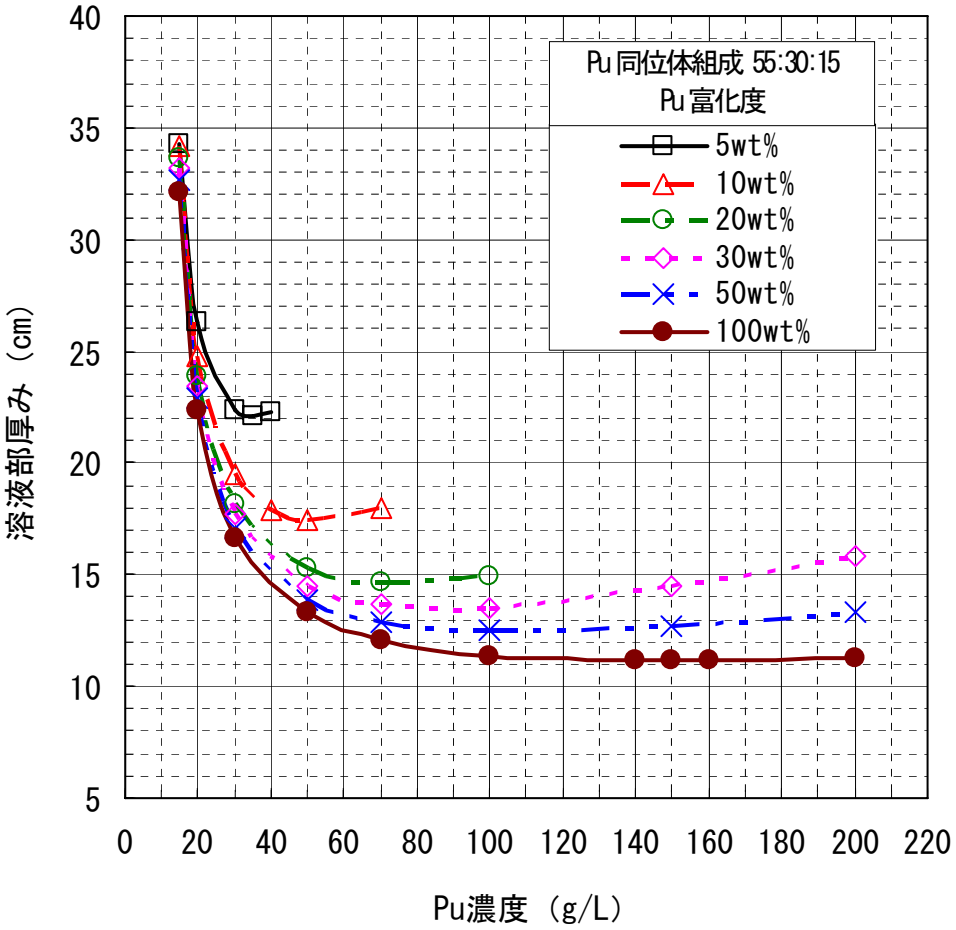


Pu 濃度 (g/L)	Pu 富化度（wt%）					
	5	10	20	30	50	100
	溶液部厚（cm）					
10	64.5 (63.9)	74.9 (74.3)	80.7	80.8 (80.7)	80.6 (79.8)	79.5 (79.3)
15	29.4 (29.0)	28.7 (28.5)	28.1	27.7 (27.4)	27.3 (27.0)	26.9 (26.7)
20	23.4	22.0	21.1	20.7	20.3	19.9
30	20.2 (19.8)	17.7 (17.3)	16.4	16.0 (15.7)	15.5 (15.3)	15.1 (14.8)
35	**20.0 (19.6)**					
40	20.3 (19.8)	16.3 (15.9)				
50		**15.9 (15.5)**	13.9	13.3	12.7	12.2
70		16.5 (15.9)	**13.4 (13.0)**	12.6 (12.2)	11.9 (11.5)	11.2 (10.8)
100			13.7	**12.5 (12.1)**	**11.5 (11.1)**	10.6 (10.2)
140						**10.3 (10.0)**
150				13.1	11.6	**10.4**
160						**10.3**
200				14.2 (13.7)	12.1 (11.6)	10.4 (9.9)

（太字は最小値、( )内は Cd をボイドに置き換えた場合）

図 4.2.2.2-3 (3)　円環槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff+3σ ≦0.95）の関係

Pu 同位体組成　60:25:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：　2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：　0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

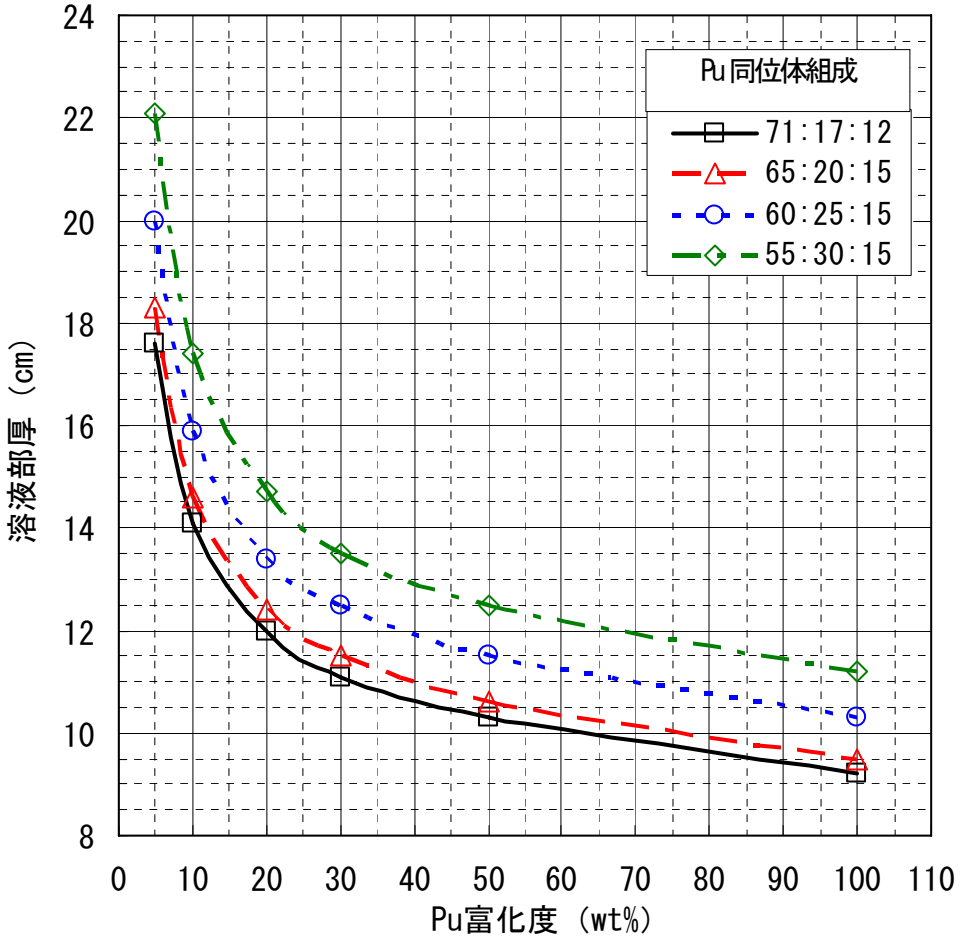


Pu 濃度 (g/L)	Pu 富化度（wt%）					
	5	10	20	30	50	100
	溶液部厚（cm）					
10	122.7 (123.0)	∞	∞	∞	∞	∞
15	34.3 (33.9)	34.2 (33.6)	33.6	33.2 (32.8)	32.7 (32.4)	32.1 (31.6)
20	26.3	24.8	23.9	23.4	22.9	22.4
30	22.4 (22.0)	19.5 (19.2)	18.2	17.7 (17.3)	17.1 (16.8)	16.6 (16.3)
35	**22.1 (21.6)**					
40	22.3 (21.8)	17.9 (17.5)				
50		**17.4 (16.9)**	15.3	14.5	13.9	13.3
70		18.0 (17.5)	**14.7 (14.2)**	13.7 (13.3)	12.9 (12.5)	12.1 (11.8)
100			14.9	**13.5 (13.1)**	**12.5 (12.1)**	11.4 (11.1)
140						**11.2**
150				14.5	12.7	**11.2**
160						**11.2 (10.8)**
200				15.8 (15.1)	13.3 (12.7)	11.3 (10.8)

（太字は最小値、( )内は Cd をボイドに置き換えた場合）

図 4.2.2.2-3 (4)　円環槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff+3σ ≦0.95）の関係

Pu 同位体組成　55:30:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：　2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：　0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

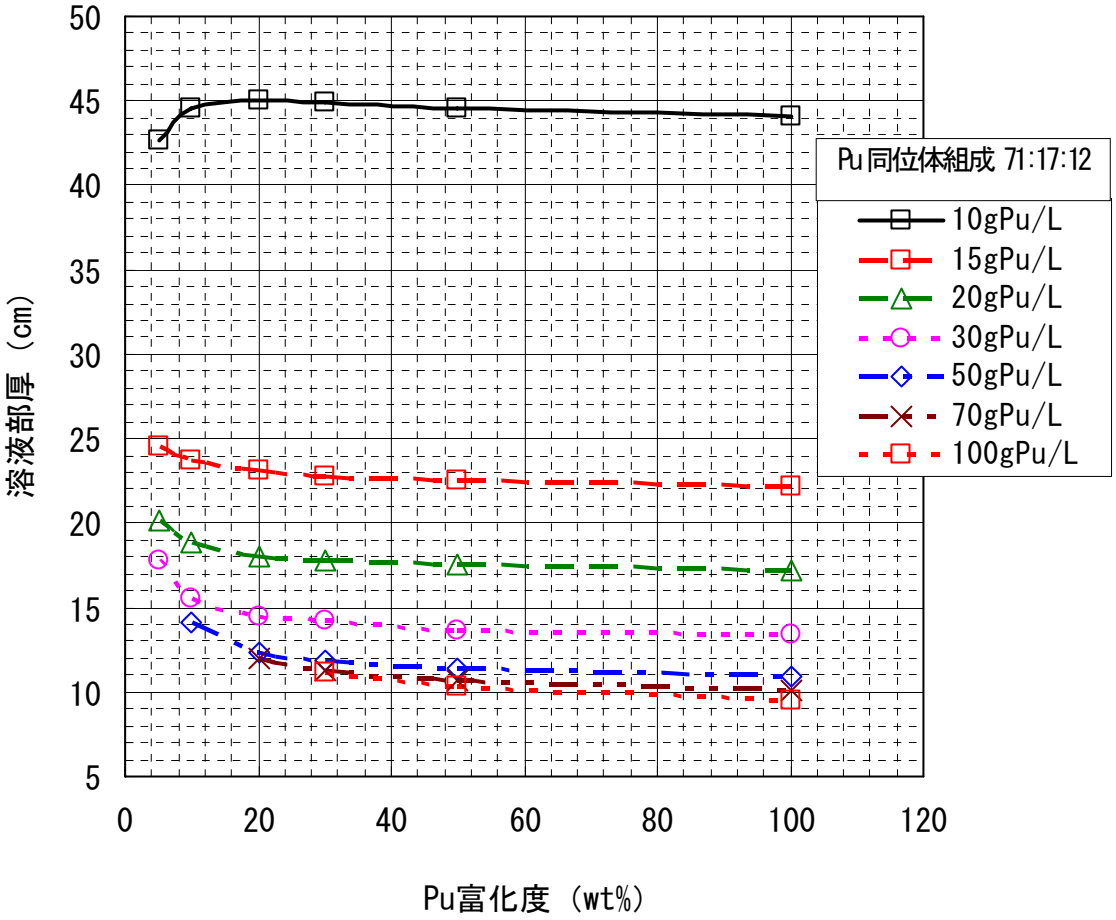


Pu 富化度 (wt%)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部液厚 (cm)			
5	17.6 (17.2)	18.3 (17.9)	20.0 (19.6)	22.1 (21.6)
10	14.1 (13.7)	14.6 (14.2)	15.9 (15.5)	17.4 (16.9)
20	12.0 (11.6)	12.4 (12.0)	13.4 (13.0)	14.7 (14.2)
30	11.1 (10.7)	11.5 (11.0)	12.5 (12.1)	13.5 (13.1)
50	10.3 (9.8)	10.6 (10.2)	11.5 (11.1)	12.5 (12.1)
100	9.2 (8.8)	9.5 (9.1)	10.3 (10.0)	11.2 (10.8)

( )内は Cd をボイドに置き換えた場合

図 4.2.2.2-4　円環槽　単一ユニット　Pu 富化度－全濃度安全溶液部液厚（keff+3σ ≦0.95）の関係

U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：　2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：　0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

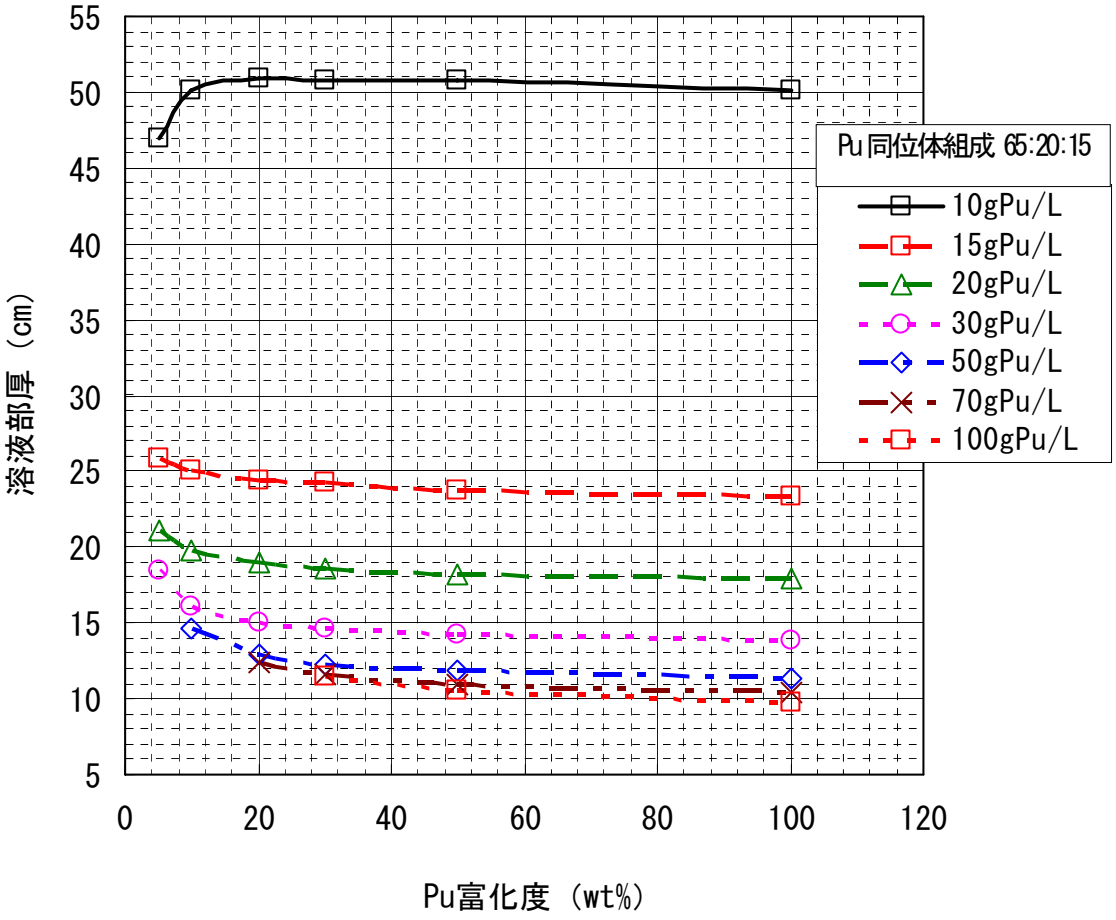


Pu 富化度 (wt%)	Pu 濃度（g/L）						
	10	15	20	30	50	70	100
5	42.6	24.5	20.2	17.8			
10	44.6	23.7	18.9	15.5	14.1		
20	45.0	23.1	18.0	14.5	12.4	12.0	
30	44.9	22.8	17.8	14.2	11.9	11.3	11.1
50	44.6	22.5	17.5	13.7	11.4	10.7	10.3
100	44.1	22.2	17.2	13.4	10.9	10.1	9.5

（各 Pu 富化度について、Pu 濃度が 0g/L から溶液部半径が最小値となる濃度までの範囲をプロット）

図 4.2.2.2-5 (1)　円環槽　単一ユニット　Pu 富化度－溶液部厚（keff+3 σ ≦0.95）の関係

Pu 同位体組成　71:17:12、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：　2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：　0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

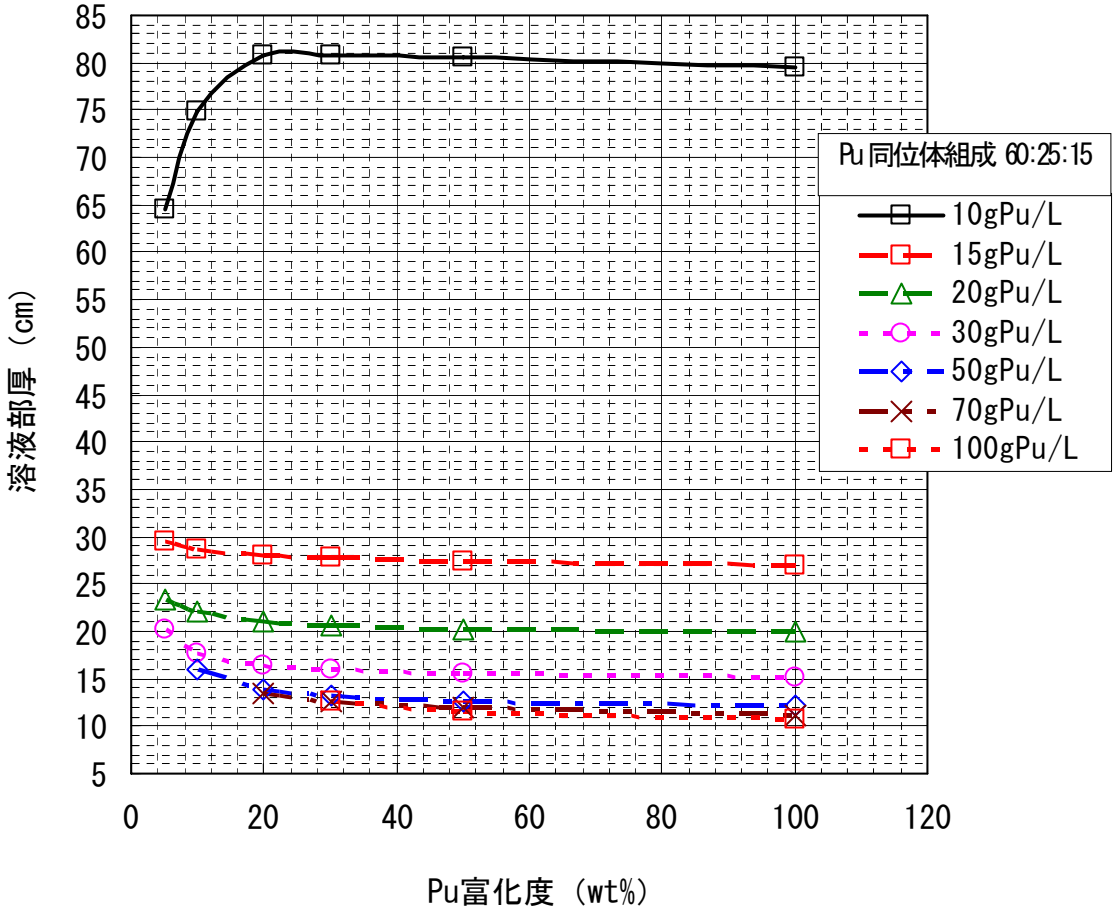


Pu 富化度 (wt%)	Pu 濃度 (g/L)						
	10	15	20	30	50	70	100
5	46.9	25.9	21.1	18.5			
10	50.1	25.1	19.8	16.1	14.6		
20	50.9	24.4	19.0	15.0	12.9	12.4	
30	50.8	24.2	18.6	14.6	12.3	11.6	11.5
50	50.8	23.7	18.2	14.2	11.8	11.0	10.6
100	50.1	23.4	17.9	13.8	11.3	10.4	9.8

（各 Pu 富化度について、Pu 濃度が 0g/L から溶液部半径が最小値となる濃度までの範囲をプロット）

図 4.2.2.2-5 (2)　円環槽　単一ユニット　Pu 富化度－溶液部厚（keff+3 σ ≦0.95）の関係

Pu 同位体組成　65:20:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：　2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：　0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

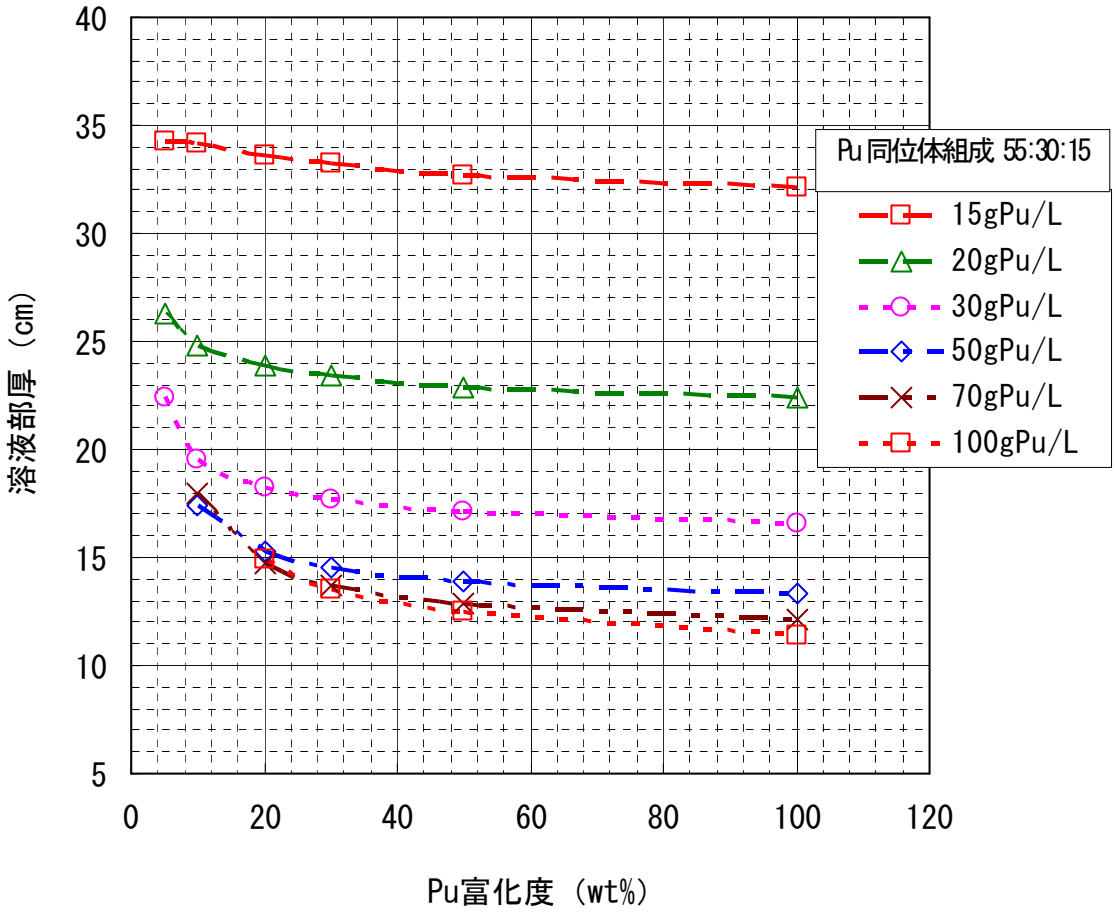


Pu 富化度 (wt%)	Pu 濃度 (g/L)						
	10	15	20	30	50	70	100
5	64.5	29.4	23.4	20.2			
10	74.9	28.7	22.0	17.7	15.9		
20	80.7	28.1	21.1	16.4	13.9	13.4	
30	80.8	27.7	20.7	16.0	13.3	12.6	12.5
50	80.6	27.3	20.3	15.5	12.7	11.9	11.5
100	79.5	26.9	19.9	15.1	12.2	11.2	10.6

（各 Pu 富化度について、Pu 濃度が 0g/L から溶液部半径が最小値となる濃度までの範囲をプロット）

図 4.2.2.2-5 (3)　円環槽　単一ユニット　Pu 富化度－溶液部厚（keff+3 σ ≦0.95）の関係

Pu 同位体組成　60:25:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：　2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：　0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

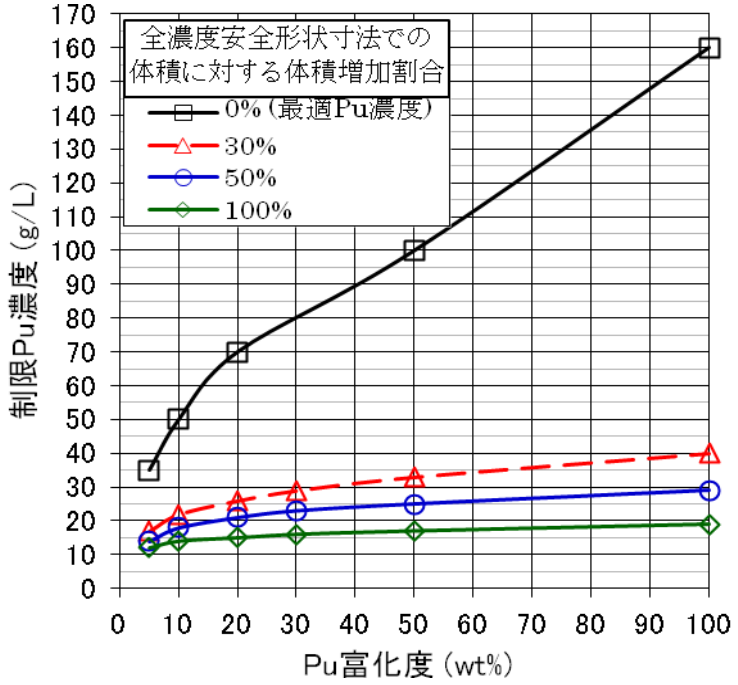


Pu 富化度 (wt%)	Pu 濃度 (g/L)						
	10	15	20	30	50	70	100
5	∞	34.3	26.3	22.4			
10	∞	34.2	24.8	19.5	17.4	18.0	
20	∞	33.6	23.9	18.2	15.3	14.7	14.9
30	∞	33.2	23.4	17.7	14.5	13.7	13.5
50	∞	32.7	22.9	17.1	13.9	12.9	12.5
100	∞	32.1	22.4	16.6	13.3	12.1	11.4

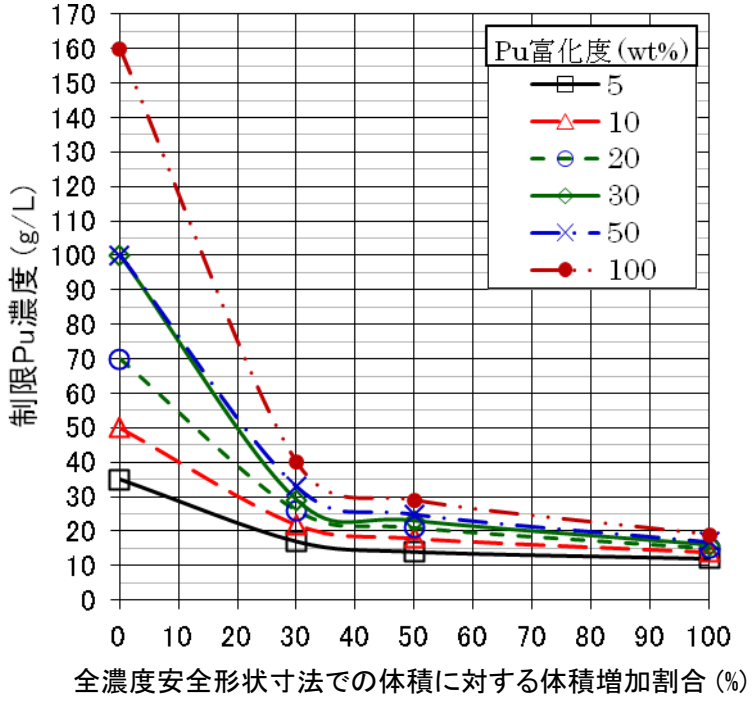
（各 Pu 富化度について、Pu 濃度が 0g/L から溶液部半径が最小値となる濃度までの範囲をプロット）

図 4.2.2.2-5 (4)　円環槽　単一ユニット　Pu 富化度－溶液部厚（keff+3σ ≦0.95）の関係

Pu 同位体組成　55:30:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：　2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：　0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射



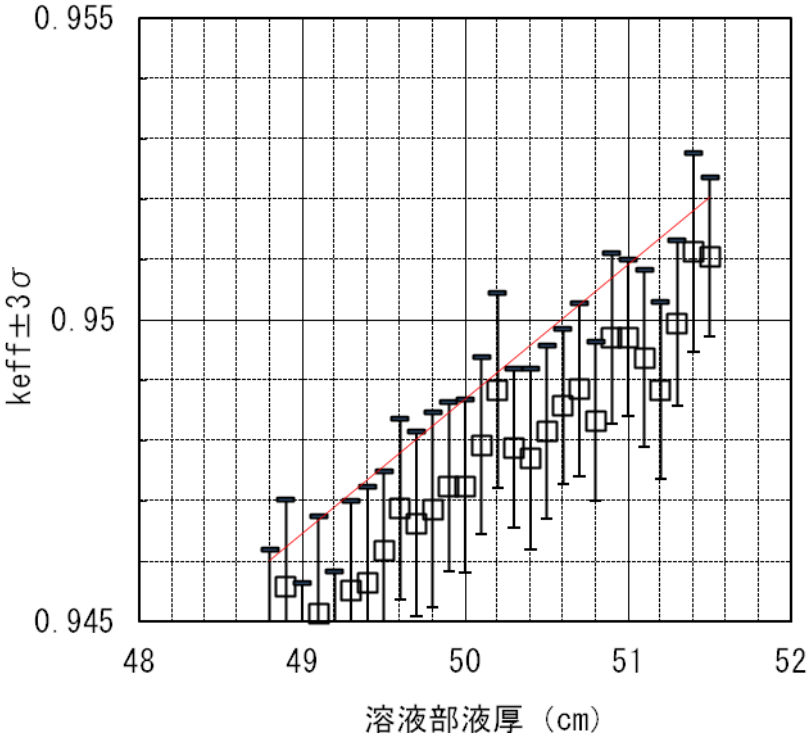
(1) Pu 富化度 - 制限 Pu 濃度関係



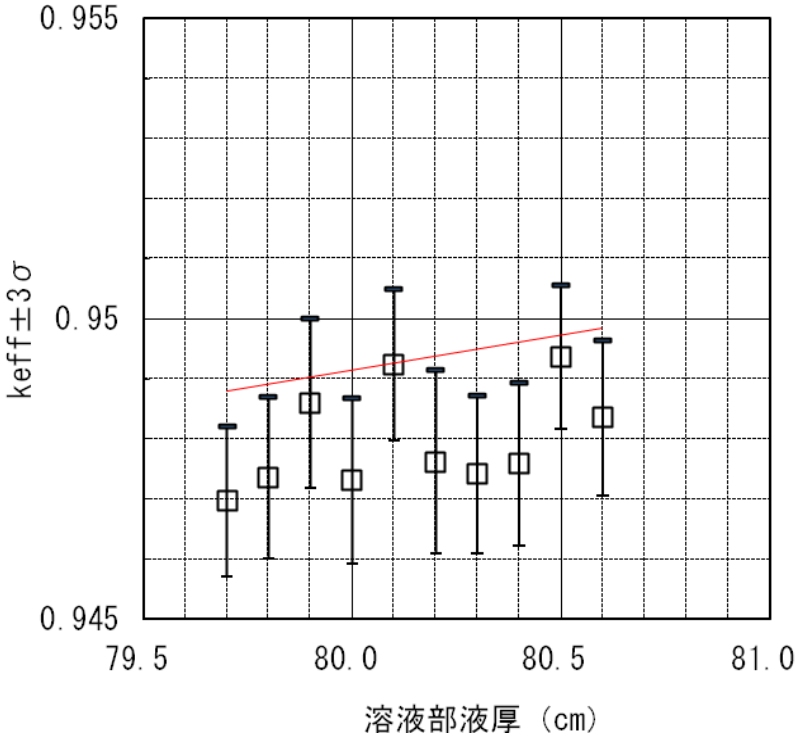
(2) 体積増加割合 - 制限 Pu 濃度関係

図 4.2.2.2-6　円環槽　単一ユニット　全濃度安全形状寸法での体積を所定の割合だけ増加させるのに必要な制限 Pu 濃度

Pu 同位体組成　65:20:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：　2.0cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射



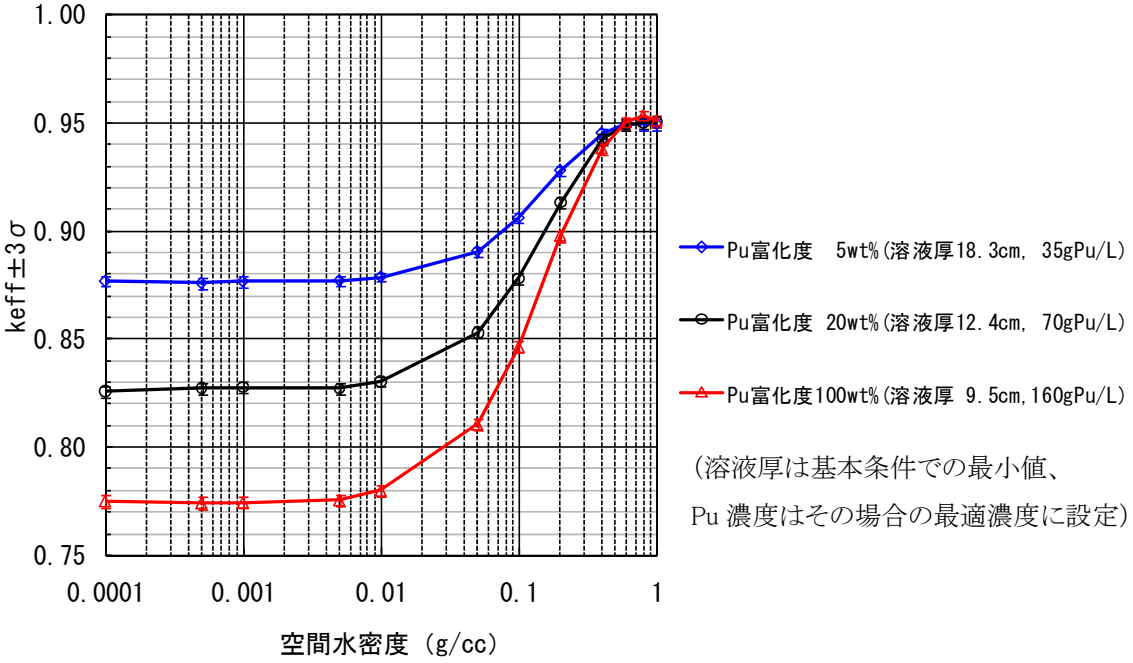
(1) Pu 同位体組成　65:20:15、Pu 濃度 10g/L



(2) Pu 同位体組成　60:25:15、Pu 濃度 10g/L

図4.2.2.2-7　円環槽　単一ユニット　溶液部液厚－keff の関係（Cd 無し）

（直線は keff+3 σ の直線近似）

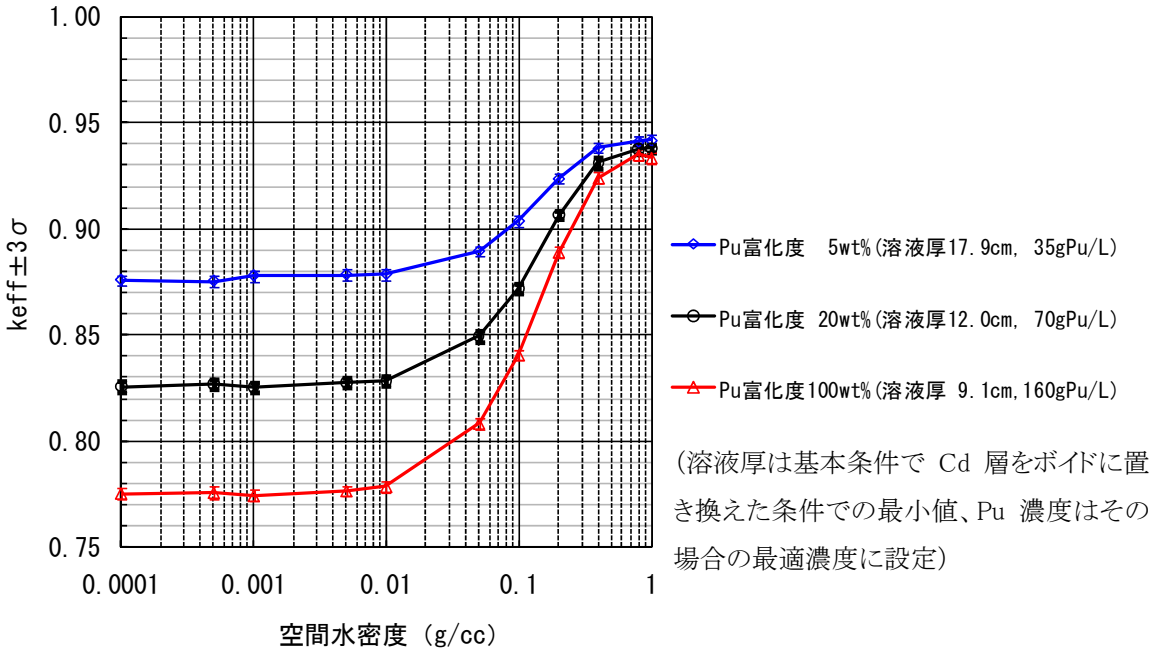


溶液組成条件 (基本条件での 最小液厚と最適 Pu 濃度)	Pu 富化度 5wt% 溶液厚 18.3cm 35gPu/L		Pu 富化度 20wt% 溶液厚 12.4cm 70gPu/L		Pu 富化度 100wt% 溶液厚 9.5cm 160gPu/L	
空間水密度(g/cc)	keff	σ	keff	σ	keff	σ
0	0.87565	0.00080	0.82629	0.00085	0.77382	0.00091
0.0001	0.87660	0.00075	0.82575	0.00088	0.77513	0.00102
0.0005	0.87581	0.00084	0.82720	0.00080	0.77427	0.00089
0.001	0.87655	0.00089	0.82775	0.00080	0.77448	0.00093
0.005	0.87693	0.00077	0.82717	0.00082	0.77558	0.00092
0.01	0.87871	0.00073	0.83046	0.00085	0.77997	0.00085
0.05	0.89054	0.00073	0.85294	0.00087	0.81061	0.00088
0.1	0.90583	0.00078	0.87803	0.00085	0.84631	0.00086
0.2	0.92783	0.00082	0.91322	0.00088	0.89777	0.00090
0.4	0.94506	0.00076	0.94250	0.00078	0.93804	0.00086
0.6	0.94919	0.00083	0.94917	0.00084	0.95015	0.00091
0.8	**0.94933**	0.00088	0.95000	0.00085	**0.95318**	0.00091
1	0.94921	0.00080	**0.95065**	0.00084	0.95082	0.00086
基本条件 (外側水全反射 内側ボイド)	0.94637	0.00076	0.94594	0.00078	0.94375	0.00084
keff 最大の空間水密度で keff+3σ ≦0.95 となる 溶液厚 (基本条件との差)	18.2 (-0.1)		12.2 (-0.2)		9.4 (-0.1)	

（太字は最大値）

図4.2.2.2-8　円環槽（単一ユニット）の空間水密度－keff の関係

Pu 同位体組成　65:20:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側：　2cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側：0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射



（溶液厚は基本条件で Cd 層をボイドに置き換えた条件での最小値、Pu 濃度はその場合の最適濃度に設定）

溶液組成条件 （基本条件での 最小液厚と最適 Pu 濃度）	Pu 富化度 5wt% 溶液厚 17.9cm 35gPu/L		Pu 富化度 20wt% 溶液厚 12.0cm 70gPu/L		Pu 富化度 100wt% 溶液厚 9.5cm 160gPu/L	
空間水密度(g/cc)	keff	σ	keff	σ	keff	σ
0	0.87677	0.00082	0.82758	0.00090	0.77514	0.00091
0.0001	0.87576	0.00080	0.82572	0.00080	0.77535	0.00091
0.0005	0.87529	0.00076	0.82712	0.00081	0.77570	0.00092
0.001	0.87779	0.00085	0.82543	0.00085	0.77422	0.00089
0.005	0.87834	0.00075	0.82777	0.00080	0.77652	0.00086
0.01	0.87844	0.00076	0.82858	0.00091	0.77850	0.00095
0.05	0.88934	0.00080	0.84947	0.00079	0.80834	0.00089
0.1	0.90365	0.00077	0.87201	0.00082	0.84055	0.00086
0.2	0.92373	0.00070	0.90663	0.00081	0.88903	0.00090
0.4	0.93809	0.00079	0.93111	0.00080	0.92398	0.00089
0.6	0.94039	0.00070	0.93633	0.00082	0.93343	0.00092
0.8	0.94137	0.00070	0.93743	0.00083	**0.93490**	0.00091
1	**0.94189**	0.00069	**0.93795**	0.00084	0.93354	0.00085
基本条件 (外側水全反射 内側ボイド)	0.94618	0.00071	0.94520	0.00086	0.94560	0.00093

（太字は最大値）

図4.2.2.2-9 円環槽（単一ユニット）の空間水密度－keff の関係（Cd をボイドにした場合）

Pu 同位体組成 65:20:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側： 2cmSUS、10.05cm ボイド、10cm ポリエチレン
溶液部外側： 0.3cmSUS
上下側面 20cm 水反射

4.2.2.3 複数ユニットの制限寸法

円環槽を水平面上に複数配置することを想定し、複数ユニットに関する計算を行った。円環槽相互の中性子干渉を低減するため、単一ユニットのモデルと異なり、外側にも内側と同じ中性性吸収材（0.05cm Cd + 10cm ポリエチレン）を配置したモデルとした。ユニット間では Cd 0.1cm 以上、ポリエチレン 20cm 以上存在することになり、3.3(3)(c)項で説明し、4.2.2.2(2)項で確認したように、ポリエチレンだけでもほぼ十分な隔離能力があり、さらに十分な厚みの Cd があるので、円環槽は実質上、単一ユニットとみなすことができ、前項の単一ユニットの制限寸法が適用できると考えられる。

従って、以下では、これを確認するための計算を行うにとどめ、前項で行ったような制限寸法を求めることまでは行わない。

(1) 計算条件

(a) 計算モデル

円環槽溶液部外側に配置する中性子吸収材は、4.2.2.1(4)項に説明した理由により、間に空間を設けず溶液部側に密着させた配置とする。

4.2.2.1 項の条件設定と 4.2.2.2 項の単一ユニットの計算条件に対し、唯一、溶液部の外側の条件を、0.3 cm SUS + 20cm 水反射に替えて、2cm SUS 、0.05cm Cd＋10cm ポリエチレンとし、それに外接する正方形の外側を鏡面反射条件として、円環槽が正方格子状に無限配列したモデルとした。計算モデルを図 4.2.2.3-1 に示す。

(b) 溶液部厚と濃度

3 種類の Pu 同位体組成、3 種類の Pu 富化度（5、20、100 wt%）について、それぞれ 4.2.2.2(1)項の単一ユニットの基本条件での計算の最小溶液部厚とその時の最適濃度を用いた。

(2) 計算結果

(1)の条件で計算した空間水密度-keff の関係を図 4.2.2.3-2(1)～(3)に示す。

Pu 同位体組成を変えた(1)～(3)の図はどれも同じような以下の傾向を示す。

① 計算対象としたいずれの場合でも、keff+3 σ は 0.95 より下回る。

② Pu 富化度が高いほど、keff は小さくなる

定性的には以下のような理由によるものと考えられる。複数ユニットの計算条件では、溶液部外側を単一ユニットの場合の水全反射条件に替えて中性子吸収材を密着させているために、反射効果が大きく減少する。Pu 富化度が高くなると、溶液部厚が小さくなり、溶液部からの中性子の漏洩割合が大きくなってくるため、keff に対する水全反射による反射効果の寄与が大きくなってくる。これにより、水全反射に替えて中性子吸収材を密着させることによる反射効果減少による keff の減少量は、溶液部厚が小さいほど大きくなるものと考えられる。

③ 空間水密度が 0.1g/cm^{3}を超える辺りから keff が増加し始め、ほぼ水充填状態の時が最大となり、keff の増加傾向は、Pu 富化度が高いほど大きくなる。

溶液部外側は中性子吸収材を密着させており、ユニット間の中性子相互干渉はほぼ遮断されているので、中性子吸収材の外側のユニット間の空間の水密度の変化は keff に影響しないはずである。溶液部とその内側にある中性子吸収材との間の空隙の水密度の増加による keff の増加については、4.2.2.2(3)項で既に説明した。

水密度増加による keff の増加傾向が、Pu 富化度が高いほど大きくなるのは、②で述べたように、水による反射効果の keff への寄与が、制限溶液部厚が小さくなる Pu 富化度の大きいものほど大きくなるためと考えられる。

(3) 単一ユニットの制限溶液部厚の複数ユニットへの適用性

前項(2)の①で確認されたように、単一ユニットの計算条件の溶液部外側を水全反射条件していることに替えて、ユニット間の中性子相互干渉をほぼ遮断できるような中性子吸収材を設置することにより、単一ユニットの溶液部厚が適用できる。

なお、(2)では、溶液部外側の中性子吸収材を溶液部に密着させたモデルとしているが、密着させずに隙間を設けた場合、空間水密度が十分小さいうちは、その隙間からの中性子漏洩により keff は密着させた場合より低下し、空間水密度が十分大きくなると、この隙間に水が充填されることによる水反射効果により、keff は密着させた場合より増加するものと考えられる。しかし、単一ユニットの計算条件である外側水全反射条件より反射効果は小さいので、単一ユニットの場合の keff を超えることがない。従って、外側中性子吸収材と溶液部の間に隙間を設けても、単一ユニットの制限溶液部厚が適用できる。

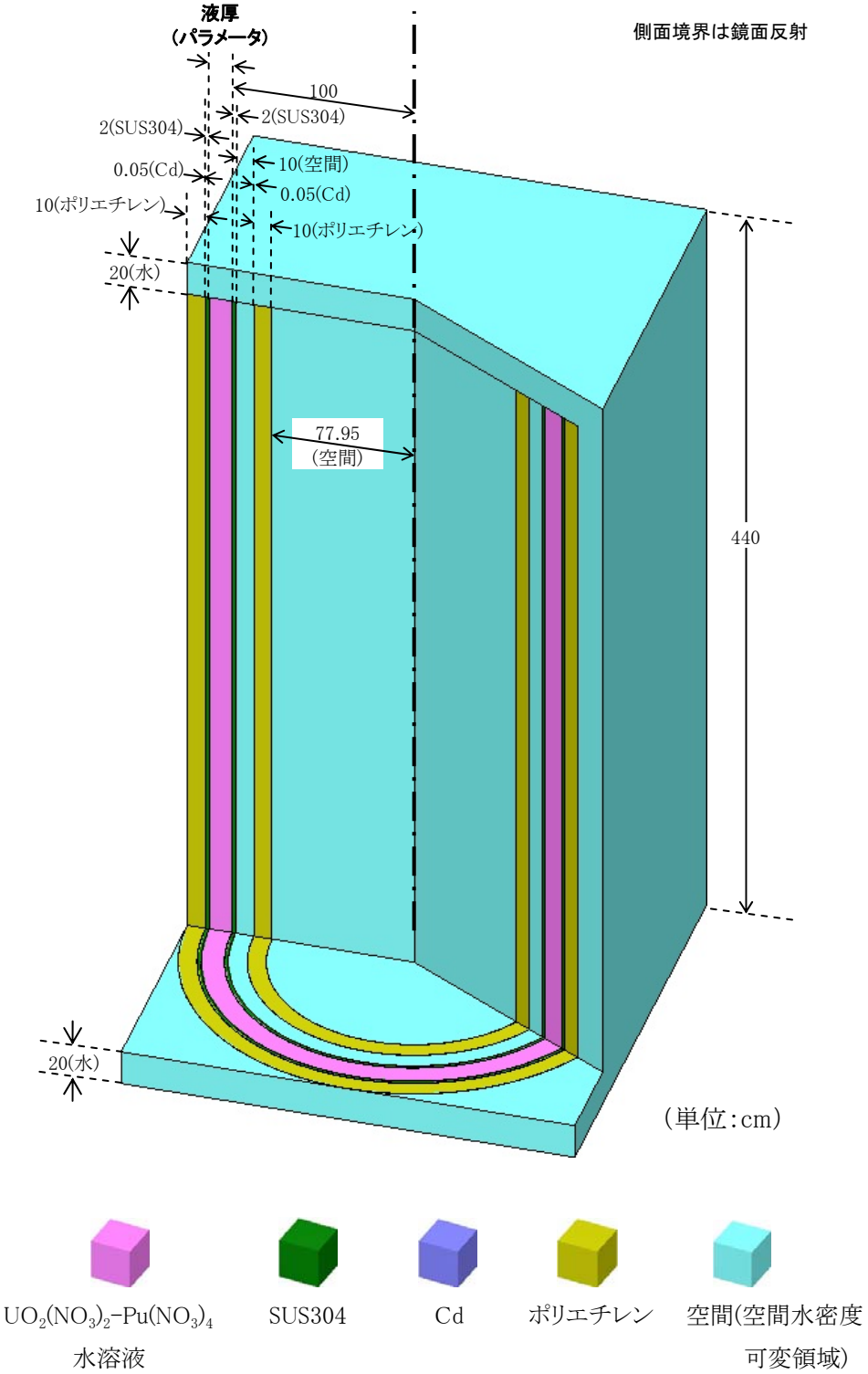
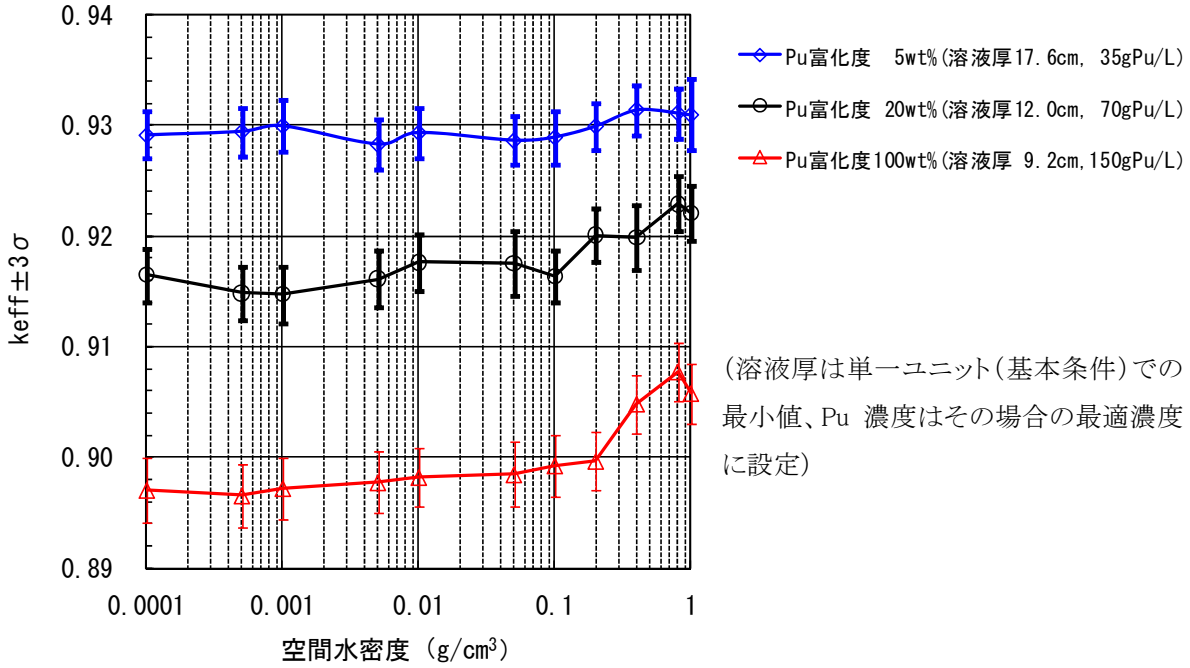


図4.2.2.3-1　円環槽　複数ユニット　計算モデル



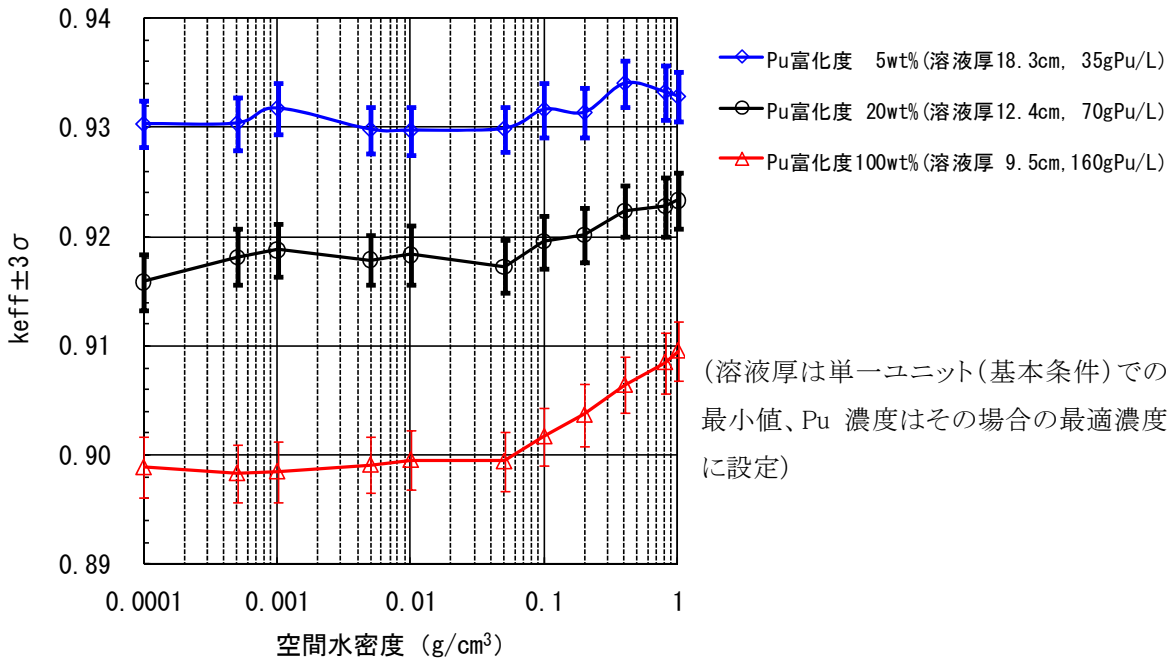
（溶液厚は単一ユニット（基本条件）での最小値、Pu 濃度はその場合の最適濃度に設定）

溶液部条件 （単一ユニットでの 最小液厚と最適 Pu 濃度）	Pu 富化度 5wt% 溶液厚 17.6cm 35gPu/L		Pu 富化度 20wt% 溶液厚 12.0cm 70gPu/L		Pu 富化度 100wt% 溶液厚 9.2m 150gPu/L	
空間水密度(g/cc)	keff	σ	keff	σ	keff	σ
0	0.92833	0.00073	0.91568	0.00088	0.89530	0.00087
0.0001	0.92913	0.00071	0.91650	0.00081	0.89704	0.00096
0.0005	0.92946	0.00073	0.91484	0.00080	0.89653	0.00095
0.001	0.92997	0.00077	0.91473	0.00085	0.89720	0.00092
0.005	0.92829	0.00076	0.91613	0.00085	0.89772	0.00093
0.01	0.92936	0.00075	0.91763	0.00086	0.89820	0.00090
0.05	0.92864	0.00074	0.91756	0.00096	0.89844	0.00098
0.1	0.92894	0.00081	0.91636	0.00080	0.89925	0.00092
0.2	0.92995	0.00072	0.92010	0.00081	0.89966	0.00088
0.4	**0.93144**	0.00076	0.91989	0.00096	0.90482	0.00087
0.8	0.93114	0.00076	**0.92290**	0.00083	**0.90773**	0.00089
1	0.93097	0.00107	0.92208	0.00084	0.90577	0.00090
単一ユニット （基本条件:外側水全反射 内側ボイド）	0.94566	0.00079	0.94659	0.00100	0.94368	0.00087

（太字は最大値）

図4.2.2.3-2 (1)　円環槽（複数ユニット）の空間水密度－keff の関係

Pu 同位体組成　71:17:12、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側:　2cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側:　2cmSUS、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
側面:鏡面反射、上下 20cm 水反射

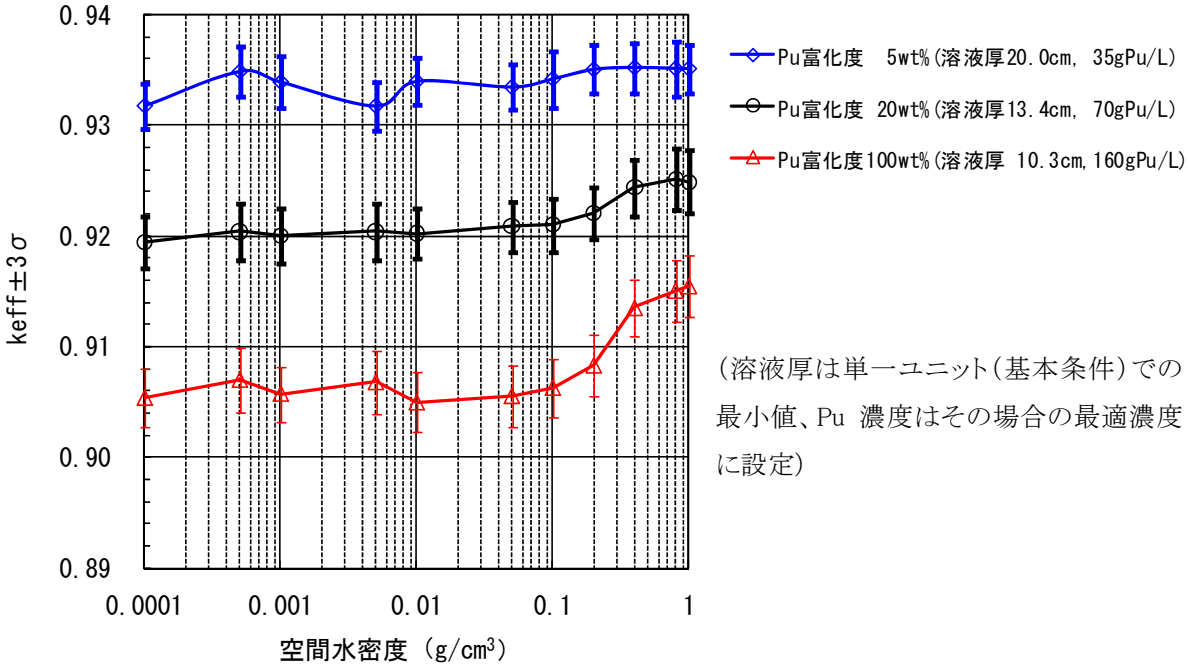


溶液部条件 (単一ユニットでの 最小液厚と最適 Pu 濃度)	Pu 富化度 5wt% 溶液厚 18.3cm 35gPu/L		Pu 富化度 20wt% 溶液厚 12.4cm 70gPu/L		Pu 富化度 100wt% 溶液厚 9.5cm 160gPu/L	
空間水密度(g/cc)	keff	σ	keff	σ	keff	σ
0	0.92986	0.00078	0.91746	0.00080	0.90062	0.00090
0.0001	0.93030	0.00071	0.91586	0.00087	0.89889	0.00092
0.0005	0.93036	0.00080	0.91815	0.00085	0.89835	0.00087
0.001	0.93173	0.00079	0.91879	0.00080	0.89851	0.00093
0.005	0.92979	0.00071	0.91789	0.00076	0.89912	0.00084
0.01	0.92971	0.00073	0.91834	0.00089	0.89956	0.00089
0.05	0.92988	0.00068	0.91727	0.00080	0.89943	0.00090
0.1	0.93161	0.00084	0.91955	0.00081	0.90171	0.00088
0.2	0.93135	0.00076	0.92018	0.00084	0.90368	0.00094
0.4	**0.93400**	0.00072	0.92235	0.00079	0.90641	0.00086
0.8	0.93320	0.00081	0.92277	0.00090	0.90847	0.00093
1	0.93280	0.00076	**0.92333**	0.00084	**0.90953**	0.00091
単一ユニット (基本条件:外側水全反射 内側ボイド)	0.94637	0.00076	0.94594	0.00078	0.94375	0.00084

(太字は最大値)

図4.2.2.3-2 (2)　円環槽(複数ユニット)の空間水密度－keff の関係

Pu 同位体組成　65:20:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側:　2cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側:　2cmSUS、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
側面:鏡面反射、上下 20cm 水反射



（溶液厚は単一ユニット（基本条件）での最小値、Pu 濃度はその場合の最適濃度に設定）

溶液部条件 （単一ユニットでの 最小液厚と最適 Pu 濃度）	Pu 富化度 5wt% 溶液厚 20.0cm 35gPu/L		Pu 富化度 20wt% 溶液厚 13.4cm 70gPu/L		Pu 富化度 100wt% 溶液厚 10.3m 160gPu/L	
空間水密度(g/cc)	keff	σ	keff	σ	keff	σ
0	0.93391	0.00075	0.92035	0.00077	0.90648	0.00083
0.0001	0.93175	0.00070	0.91947	0.00077	0.90538	0.00090
0.0005	0.93488	0.00074	0.92040	0.00084	0.90701	0.00096
0.001	0.93392	0.00078	0.92007	0.00084	0.90575	0.00083
0.005	0.93174	0.00075	0.92041	0.00084	0.90680	0.00096
0.01	0.93398	0.00070	0.92024	0.00075	0.90496	0.00090
0.05	0.93346	0.00069	0.92088	0.00075	0.90554	0.00092
0.1	0.93420	0.00085	0.92101	0.00081	0.90629	0.00088
0.2	0.93507	0.00073	0.92209	0.00079	0.90831	0.00092
0.4	**0.93524**	0.00075	0.92441	0.00085	0.91353	0.00086
0.8	0.93515	0.00082	**0.92514**	0.00091	0.91510	0.00092
1	0.93514	0.00074	0.92491	0.00094	**0.91551**	0.00093
単一ユニット （基本条件:外側水全反射 内側ボイド）	0.94654	0.00075	0.94442	0.00078	0.94445	0.00088

（太字は最大値）

図4.2.2.3-2 (3)　円環槽（複数ユニット）の空間水密度－keff の関係

Pu 同位体組成　60:25:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部内側半径 100cm、溶液部 高さ 400cm
溶液部内側:　2cmSUS、10cm ボイド、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
溶液部外側:　2cmSUS、0.05cmCd＋10cm ポリエチレン
側面:鏡面反射、上下 20cm 水反射

4.2.3 無限平板槽液厚

無限平板の計算は SCALE6 コードシステム／CSAS1 シーケンス（1 次元計算 XSDRNPM）により行った。

4.2.3.1 条件設定

(1) 機器構造材（肉厚）

4.2.1.1(1）項と同様に、構造材として 0.3 cm の SUS304 を考慮する。

4.2.3.2 単一ユニットの制限寸法

(1) 未臨界寸法

図 4.2.3.2-1 に示す計算モデルを用い、6 種類の Pu 富化度について、4 種類の Pu 同位体組成をパラメータとして、keff+3 σ ≦0.95 を満たす Pu 濃度－溶液部平板厚の関係を求めた結果を 図 4.2.3.2-2(1)～(6)に示す。同じデータについて、Pu 同位体組成毎に Pu 富化度をパラメータとしてプロットしたものを図 4.2.3.2-3(1)～(4)に示す。これらの結果から、Pu 富化度－全濃度安全制限平板厚の関係を求めたものを図 4.2.3.2-4 に示す。さらに、Pu 同位体組成毎に Pu 濃度をパラメータとして Pu 富化度－溶液部平板厚の関係を求めたものを図 4.2.3.2-5(1)～(4)に示す。

図 4.2.3.2-5 で、Pu 濃度 10g/L の場合に、最初の Pu 富化度 20～30wt%までは溶液部厚が増加していくのは、4.2.1.2 項の無限円筒の場合と同じで、その理由は 4.2.1.2 項で述べたとおりである。

これらの図から、以下のことが分かる。

- 計算範囲とした Pu 同位体組成の違いによる溶液部厚が最少となる最適 Pu 濃度の差はほとんどない （図 4.2.3.2-2(1)～(6)参照）
- Pu 富化度が増加すると、最適 Pu 濃度は増加していく （図 4.2.3.2-3(1)～(4)参照）

(2) 全濃度安全形状寸法から Pu 富化度または Pu 濃度制限することによる体積増加割合

4.2.1.2 項の(2)で検討と同様に、Pu 富化度または Pu 濃度を管理することで寸法制限を緩和し槽の体積を増加させようとする場合の効果について検討した。

図 4.2.3.2-4 より、Pu 富化度 100%（Pu 溶液）の全濃度安全制限寸法で定まる槽の体積を、Pu 富化度を制限することにより所定の割合だけ増加させるためには、Pu 富化度をいくらまで制限すればよいかについて読み取ると、Pu 同位体組成に関わらず、以下の値となる。

体積増加割合	制限 Pu 富化度
0 %	100 wt% (基準)
30 %	約 22 wt%
50 %	約 12 wt%
100 %	約 5 wt%

図 4.2.3.2-2 あるいは図 4.2.3.2-3 から、全濃度安全形状寸法で定まる槽の体積を所定の割合だけ

増加させるために、Pu 濃度をいくらに制限すればよいか、について読み取った。その関係について、Pu 富化度をパラメータにしたもの、体積増加割合をパラメータにしものを図 4.2.3.2-6 の(1)(2)にそれぞれ示す。

この図は Pu 同位体組成 65:20:15 の場合のものであるが、他の Pu 同位体組成（71:17:12、60:25:15、55:30:15）の場合の制限 Pu 濃度との差は高々 3 g/L 程度であり、ほとんど変わらない。この図から、以下のことが分かる。

- Pu 富化度が高い程、全濃度安全形状寸法での体積を所定の割合だけ増加させるために必要な Pu 制限濃度は高くなる。（図 4.2.3.2-6 の(1)参照）
- この体積増加割合を 30%以上とするために必要な Pu 制限濃度は、Pu 富化度に依存して 17～45 g/L 以下に、100%（2 倍）にするためには 12～20 g/L 以下にしなければならない。（図 4.2.3.2-6 の(2)参照）

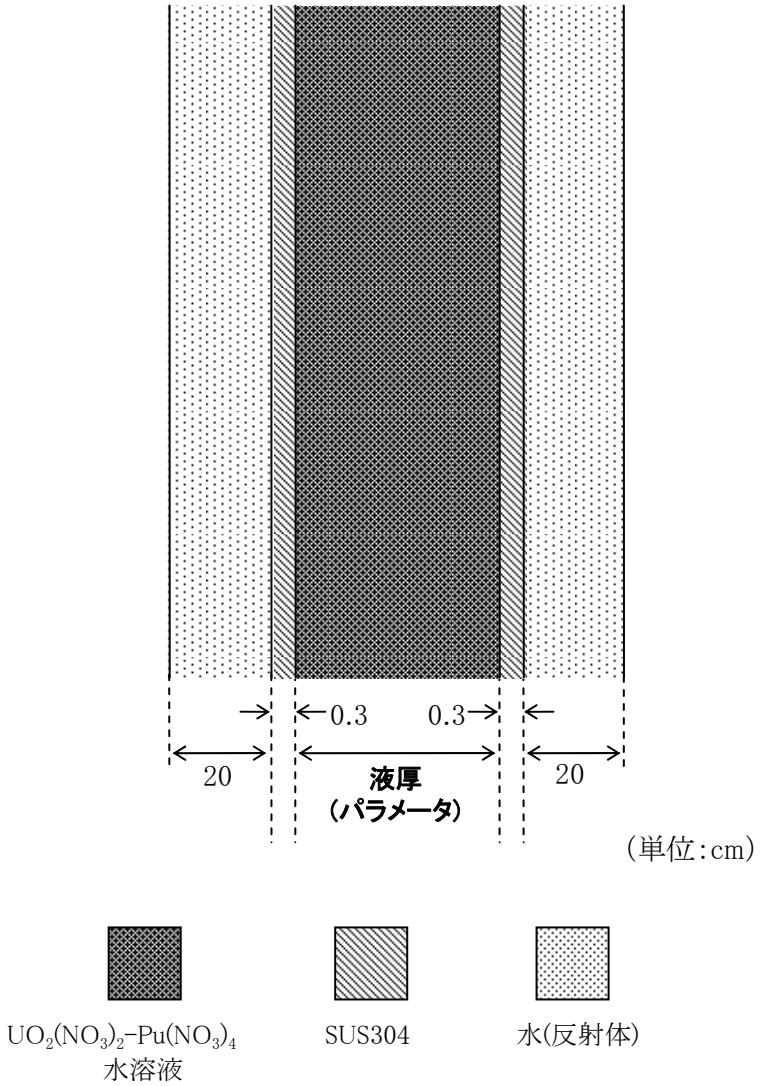
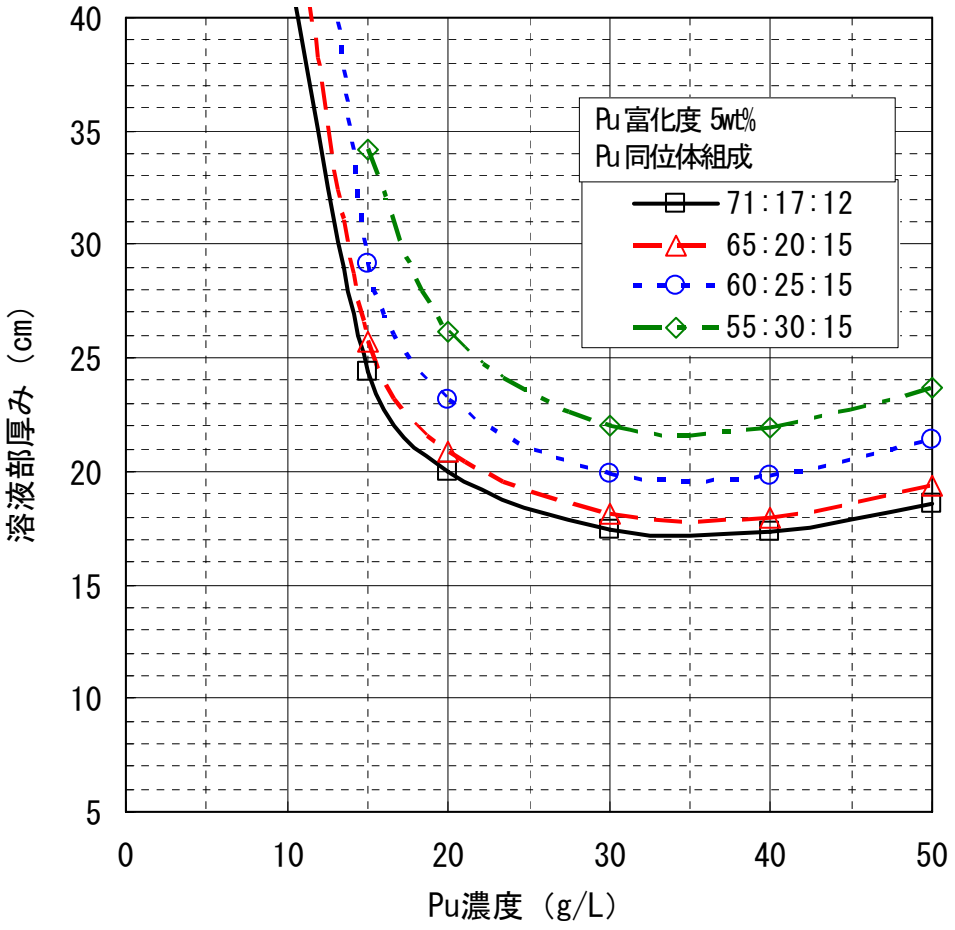


図 4.2.3.2-1　無限平板　単一ユニット　計算モデル

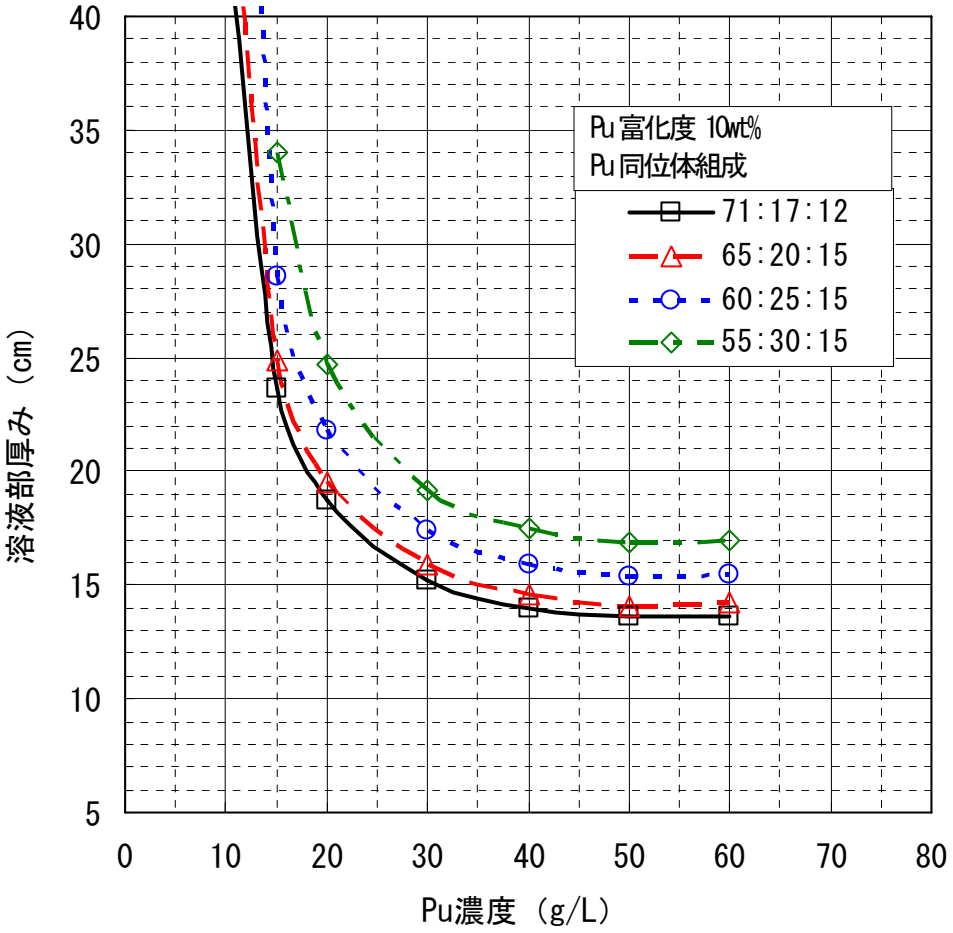


Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部厚（cm）			
10	42.4	46.9	64.2	（未計算）
15	24.4	25.7	29.2	34.2
20	20.0	20.9	23.2	26.2
30	17.4	18.1	19.9	22.0
40	**17.3**	**18.0**	**19.8**	**21.9**
50	18.6	19.4	21.4	23.7

（太字は最小値）

図 4.2.3.2-2 (1)　無限平板槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff+3σ ≦0.95）の関係

Pu 富化度 5wt%、U 濃縮度 1.6wt%
構造材：0.3cmSUS
側面 20cm 水反射

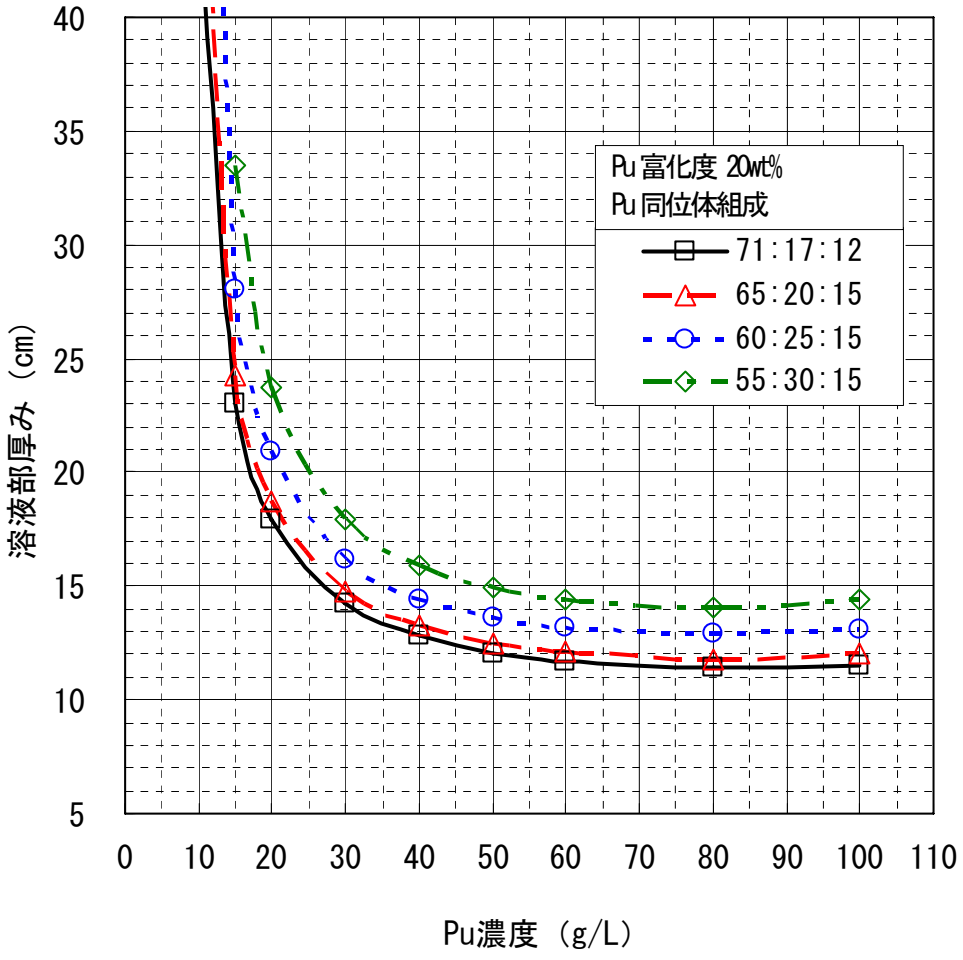


Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部厚（cm）			
10	44.6	50.1	75.3	∞
15	23.6	24.9	28.6	34.0
20	18.7	19.5	21.8	24.7
30	15.2	15.9	17.4	19.2
40	14.0	14.6	15.9	17.5
50	**13.6**	**14.1**	**15.4**	**16.9**
60	**13.6**	14.2	15.5	17.0

（太字は最小値）

図 4.2.3.2-2 (2)　無限平板槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff+3σ ≦0.95）の関係

（Pu 富化度 10wt%、U 濃縮度 1.6wt%
構造材：0.3cmSUS
側面 20cm 水反射）

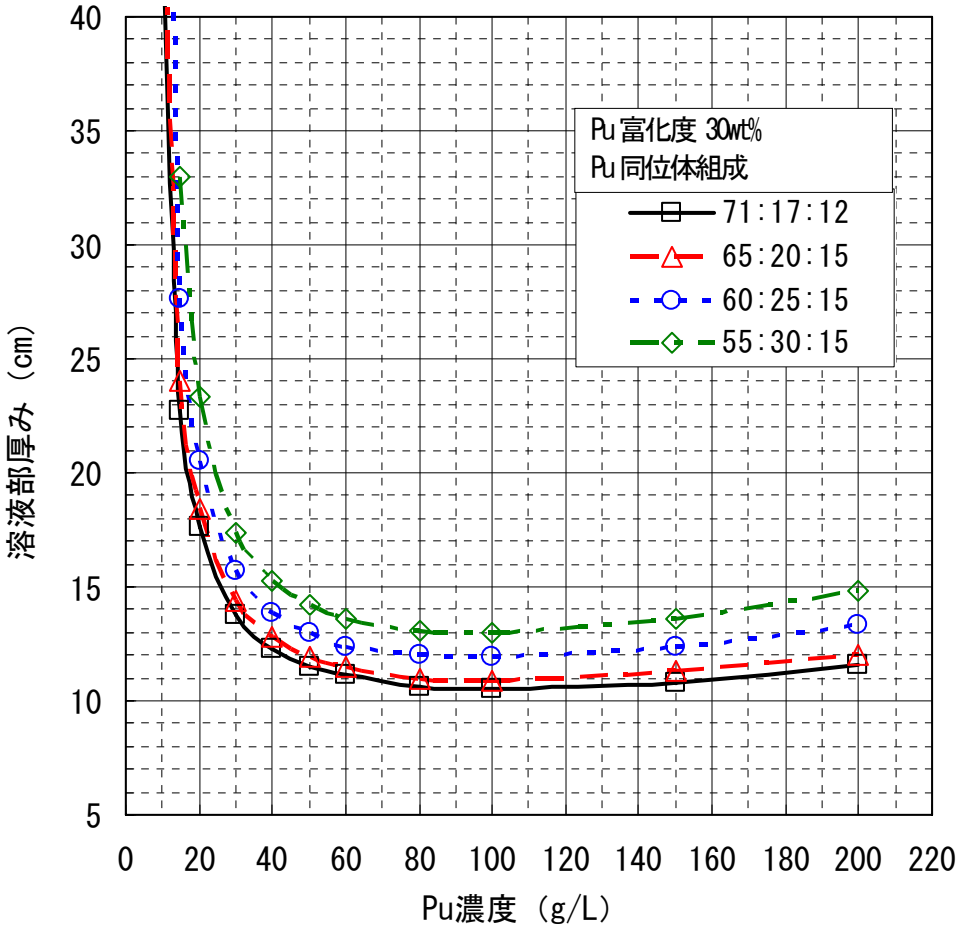


Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部厚（cm）			
10	45.0	51.1	80.5	∞
15	23.0	24.3	28.0	33.5
20	17.9	18.7	20.9	23.7
30	14.2	14.8	16.2	17.9
40	12.8	13.3	14.4	15.9
50	12.0	12.5	13.6	14.9
60	11.7	12.1	13.2	14.4
80	**11.4**	**11.8**	**12.9**	**14.1**
100	11.5	12.0	13.1	14.4

（太字は最小値）

図 4.2.3.2-2 (3)　無限平板槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff+3σ ≦0.95）の関係

（Pu 富化度 20wt%、U 濃縮度 1.6wt%
構造材：0.3cmSUS
側面 20cm 水反射）

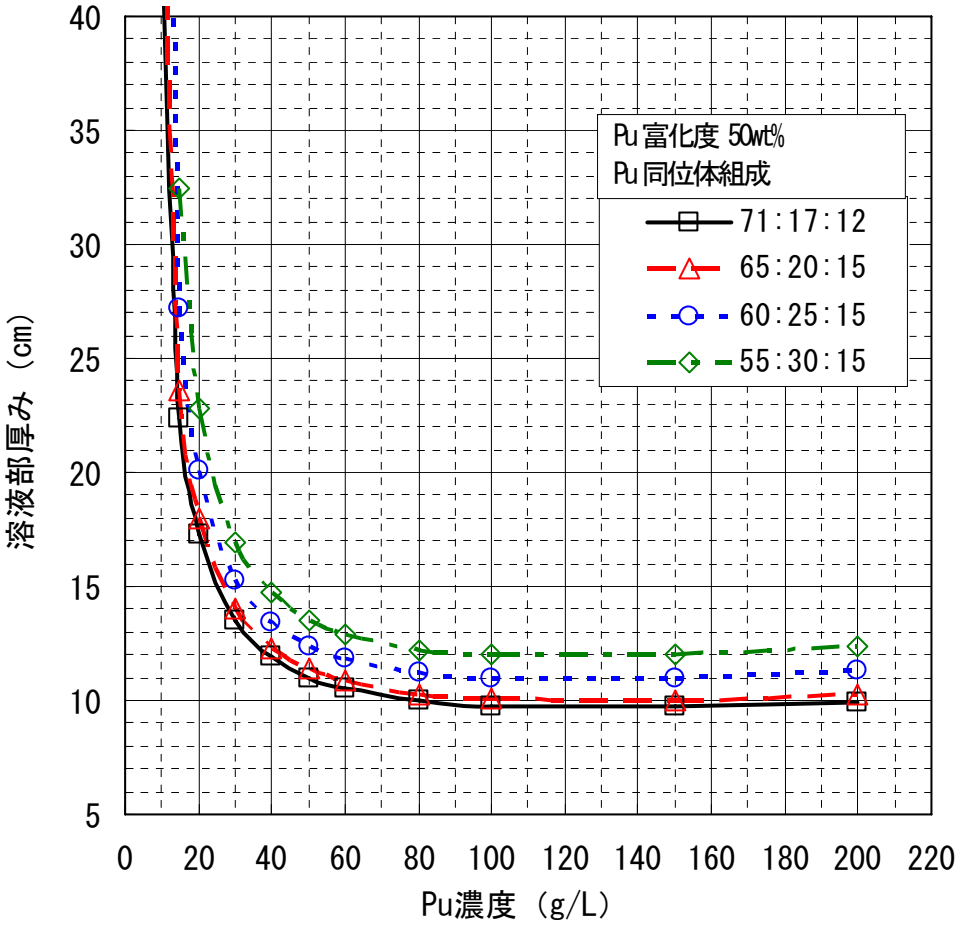


Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部厚（cm）			
10	44.9	51.0	81.2	∞
15	22.7	24.0	27.6	33.0
20	17.6	18.4	20.5	23.3
30	13.8	14.4	15.7	17.4
40	12.3	12.8	13.9	15.3
50	11.5	11.9	13.0	14.2
60	11.1	11.5	12.4	13.6
80	10.6	11.0	12.0	13.1
100	**10.5**	**10.9**	**11.9**	**13.0**
150	10.8	11.3	12.4	13.6
200	11.6	12.0	13.3	14.8

（太字は最小値）

図 4.2.3.2-2 (4)　無限平板槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff≦0.95）の関係

（Pu 富化度 30wt%、U 濃縮度 1.6wt%
構造材：0.3cmSUS
側面 20cm 水反射）

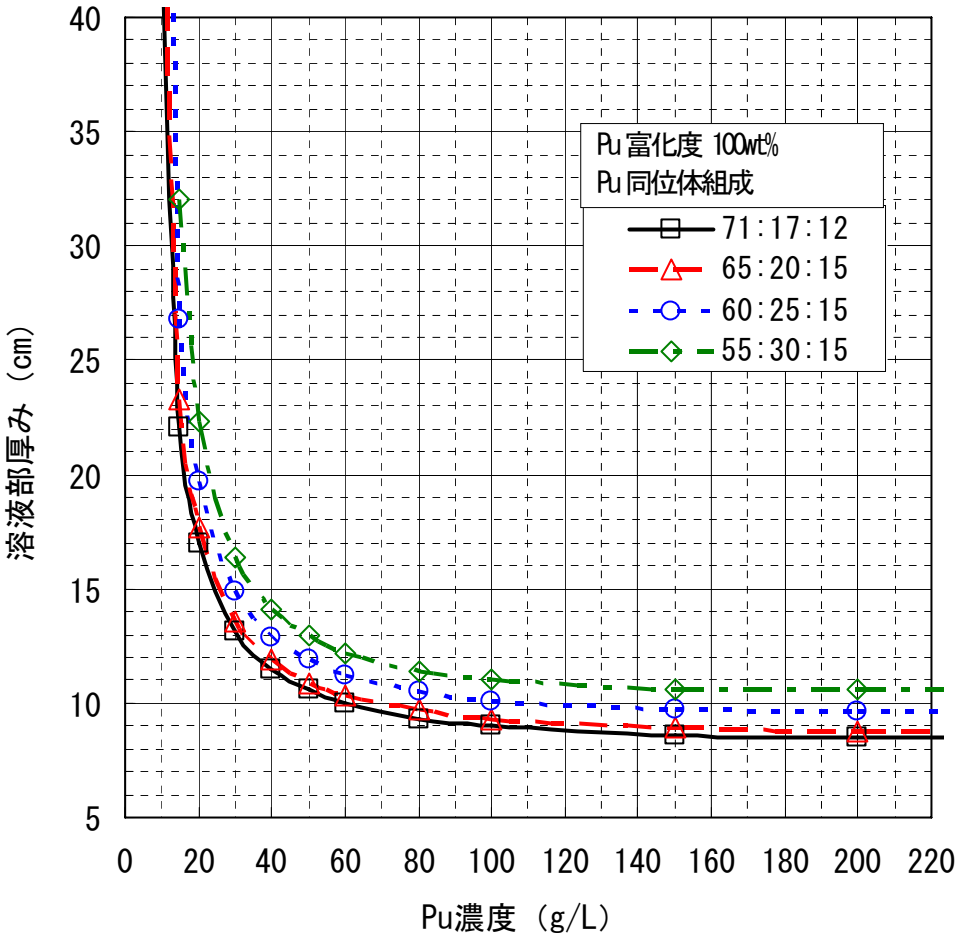


Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部厚（cm）			
10	44.6	50.7	81.0	∞
15	22.4	23.6	27.2	32.5
20	17.3	18.0	20.1	22.8
30	13.5	14.0	15.3	16.9
40	11.9	12.3	13.4	14.7
50	11.0	11.4	12.4	13.5
60	10.5	10.9	11.8	12.9
80	10.0	10.3	11.2	12.2
100	**9.7**	10.1	**11.0**	**12.0**
150	**9.7**	**10.0**	**11.0**	**12.0**
200	9.9	10.3	11.3	12.4

（太字は最小値）

図 4.2.3.2-2 (5)　無限平板槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff≦0.95）の関係

Pu 富化度 50wt%、U 濃縮度 1.6wt%
構造材：0.3cmSUS
側面 20cm 水反射

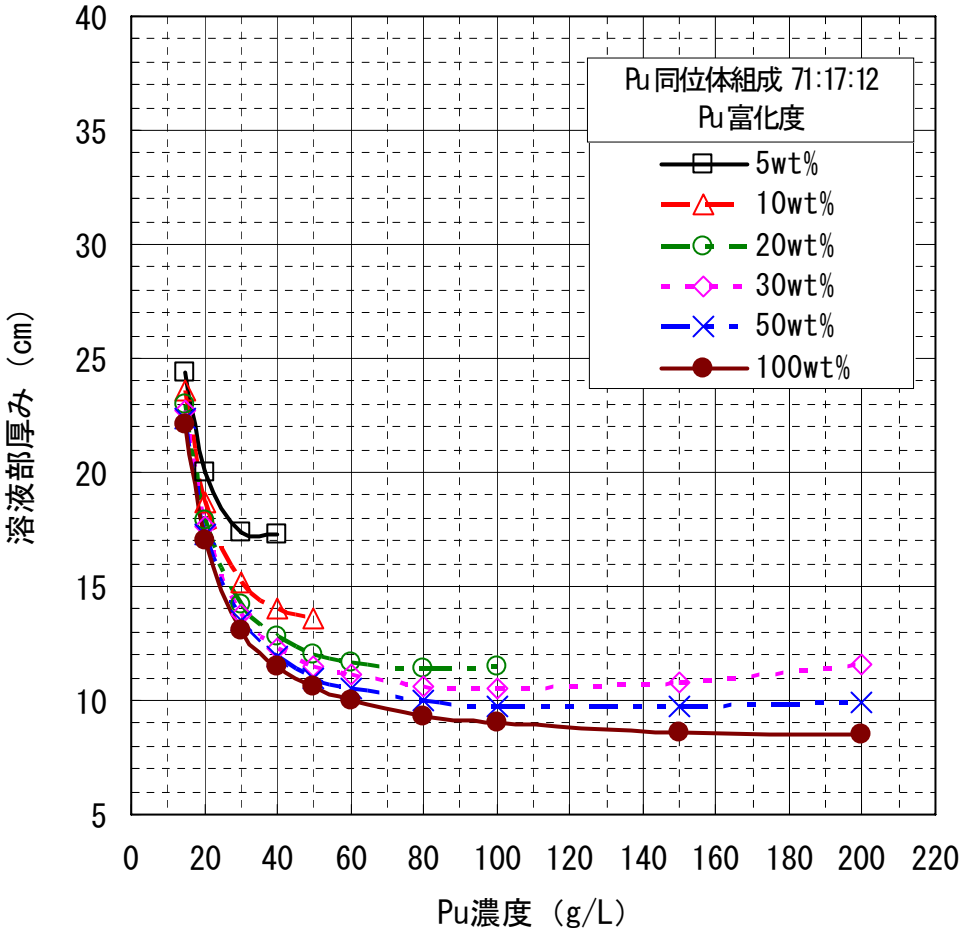


Pu 濃度 (g/L)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部厚（cm）			
10	44.2	50.2	80.1	
15	22.1	23.3	26.8	32.0
20	17.0	17.7	19.7	22.3
30	13.1	13.6	14.9	16.4
40	11.5	11.9	12.9	14.1
50	10.6	10.9	11.9	13.0
60	10.0	10.3	11.2	12.2
80	9.3	9.7	10.5	11.4
100	9.0	9.3	10.1	11.0
150	8.6	8.9	9.7	**10.6**
200	**8.5**	**8.8**	**9.6**	**10.6**
300	8.6	8.9	9.8	10.8

（太字は最小値）

図 4.2.3.2-2 (6)　無限平板槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚（keff≦0.95）の関係

Pu 富化度 100wt%、U 濃縮度 1.6wt%
構造材：0.3cmSUS
側面 20cm 水反射

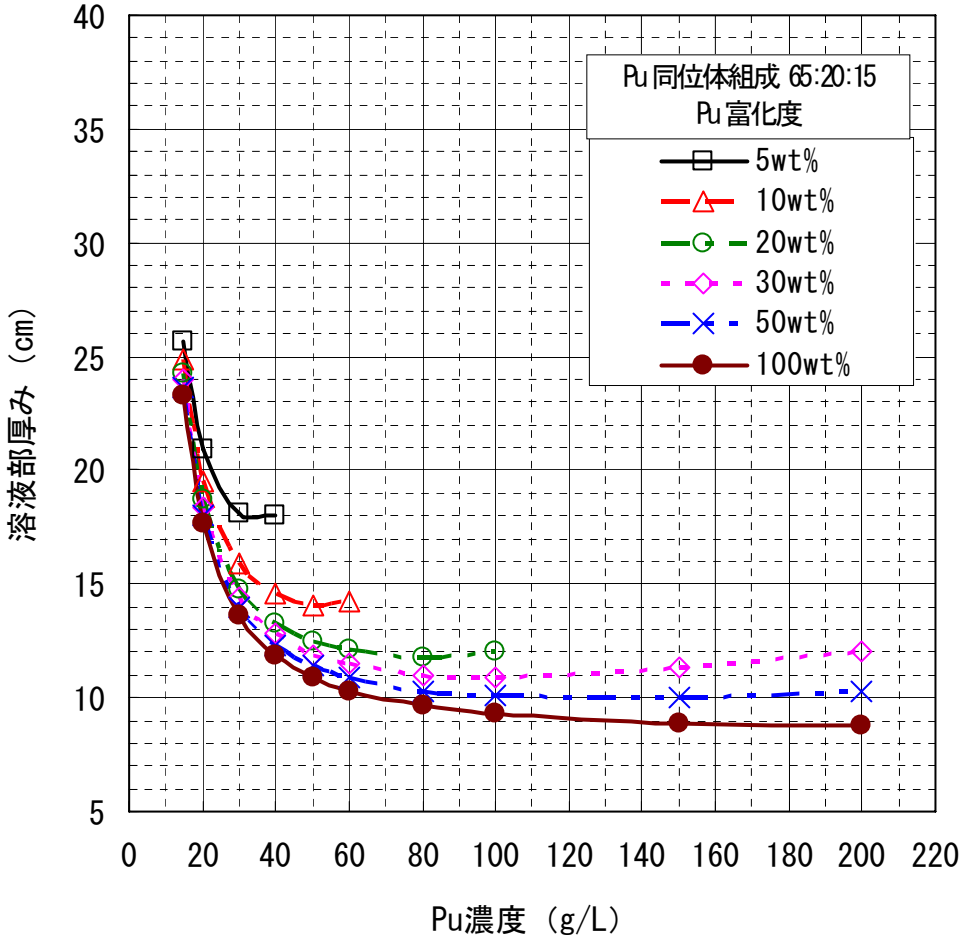


Pu 濃度 (g/L)	Pu 富化度(wt%)					
	5	10	20	30	50	100
	溶液部厚み(cm)					
10	42.4	44.6	45.0	44.9	44.6	44.2
15	24.4	23.6	23.0	22.7	22.4	22.1
20	20.0	18.7	17.9	17.6	17.3	17.0
30	17.4	15.2	14.2	13.8	13.5	13.1
40	**17.3**	14.0	12.8	12.3	11.9	11.5
50	18.6	**13.6**	12.0	11.5	11.0	10.6
60		**13.6**	11.7	11.1	10.5	10.0
80			**11.4**	10.6	10.0	9.3
100			11.5	**10.5**	**9.7**	9.0
150				10.8	**9.7**	8.6
200				11.6	9.9	**8.5**
300						8.6

（太字は最小値）

図 4.2.3.2-3 (1)　無限平板槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚(keff≦0.95)の関係

Pu 同位体組成　71:17:12、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部 高さ ∞
構造材厚 0.3cmSUS
側面 20cm 水反射

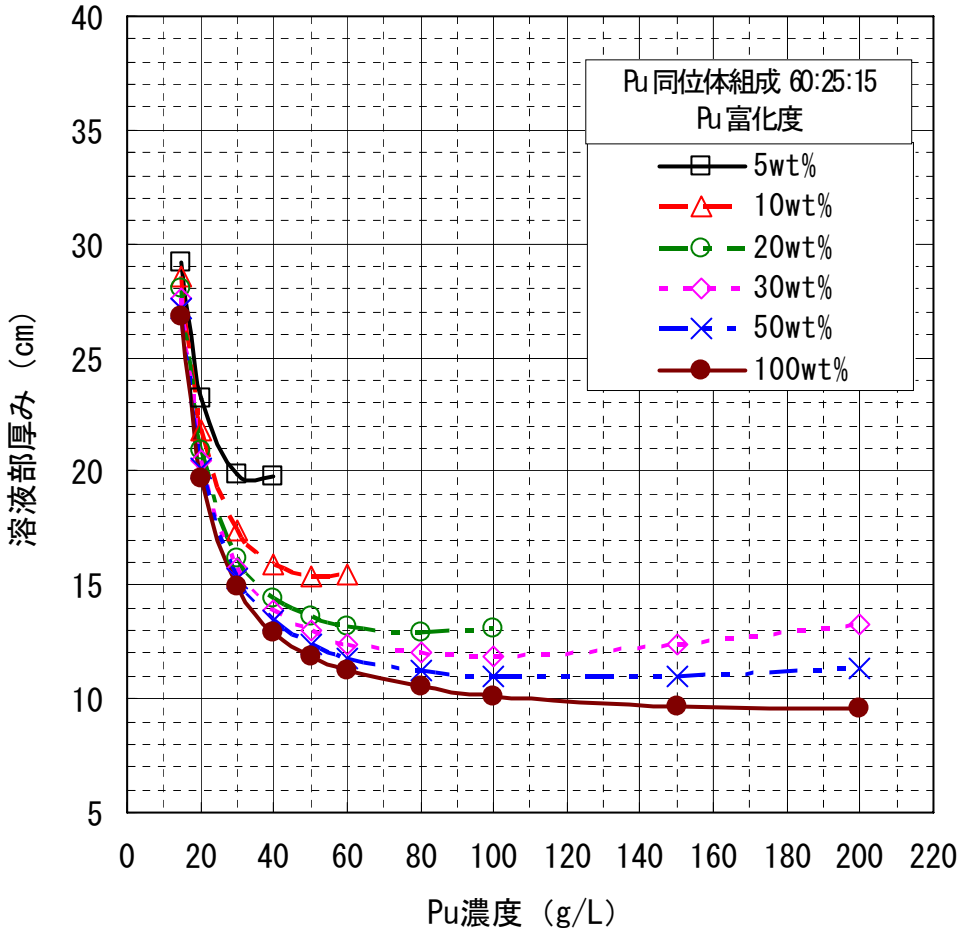


Pu 濃度 (g/L)	Pu 富化度(wt%)					
	5	10	20	30	50	100
	溶液部厚み(cm)					
10	46.9	50.1	51.1	51.0	50.7	50.2
15	25.7	24.9	24.3	24.0	23.6	23.3
20	20.9	19.5	18.7	18.4	18.0	17.7
30	18.1	15.9	14.8	14.4	14.0	13.6
40	**18.0**	14.6	13.3	12.8	12.3	11.9
50	19.4	**14.1**	12.5	11.9	11.4	10.9
60		14.2	12.1	11.5	10.9	10.3
80			**11.8**	11.0	10.3	9.7
100			12.0	**10.9**	10.1	9.3
150				11.3	**10.0**	8.9
200				12.0	10.3	**8.8**
300						8.9

（太字は最小値）

図 4.2.3.2-3 (2)　無限平板槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚(keff≦0.95)の関係

Pu 同位体組成　65:20:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部 高さ ∞
構造材厚 0.3cmSUS
側面 20cm 水反射

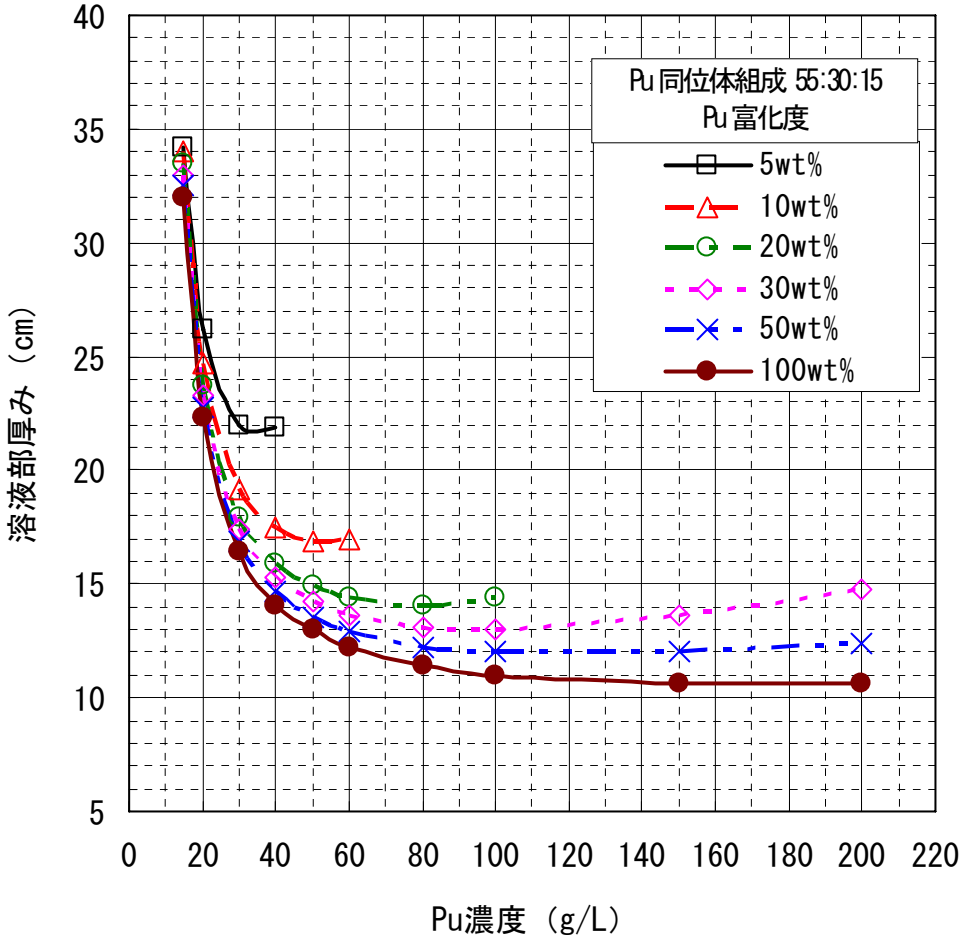


Pu 濃度 (g/L)	Pu 富化度(wt%)					
	5	10	20	30	50	100
	溶液部厚み(cm)					
10	64.2	75.3	80.5	81.2	81.0	80.1
15	29.2	28.6	28.0	27.6	27.2	26.8
20	23.2	21.8	20.9	20.5	20.1	19.7
30	19.9	17.4	16.2	15.7	15.3	14.9
40	**19.8**	15.9	14.4	13.9	13.4	12.9
50	21.4	**15.4**	13.6	13.0	12.4	11.9
60		15.5	13.2	12.4	11.8	11.2
80			**12.9**	12.0	11.2	10.5
100			13.1	**11.9**	**11.0**	10.1
150				12.4	**11.0**	9.7
200				13.3	11.3	**9.6**
300						9.8

（太字は最小値）

図 4.2.3.2-3 (3)　無限平板槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚(keff≦0.95)の関係

Pu 同位体組成　60:25:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部 高さ ∞
構造材厚 0.3cmSUS
側面 20cm 水反射

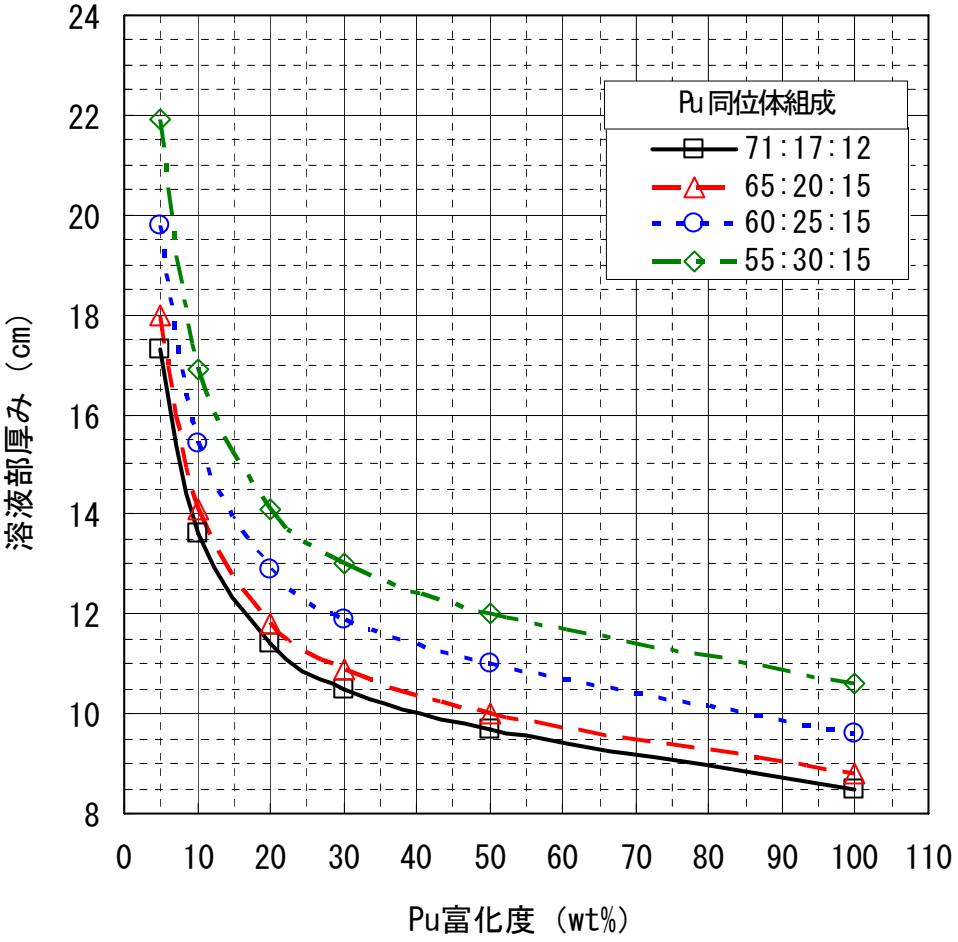


Pu 濃度 (g/L)	Pu 富化度(wt%)					
	5	10	20	30	50	100
	溶液部厚み(cm)					
10	(未計算)	∞	∞	∞	∞	∞
15	34.2	34.0	33.5	33.0	32.5	32.0
20	26.2	24.7	23.7	23.3	22.8	22.3
30	22.0	19.2	17.9	17.4	16.9	16.4
40	**21.9**	17.5	15.9	15.3	14.7	14.1
50	23.7	**16.9**	14.9	14.2	13.5	13.0
60		17.0	14.4	13.6	12.9	12.2
80			**14.1**	13.1	12.2	11.4
100			14.4	**13.0**	**12.0**	11.0
150				13.6	**12.0**	**10.6**
200				14.8	12.4	**10.6**
300						10.8

（太字は最小値）

図 4.2.3.2-3 (4)　無限平板槽　単一ユニット　Pu 濃度－溶液部液厚(keff≦0.95)の関係

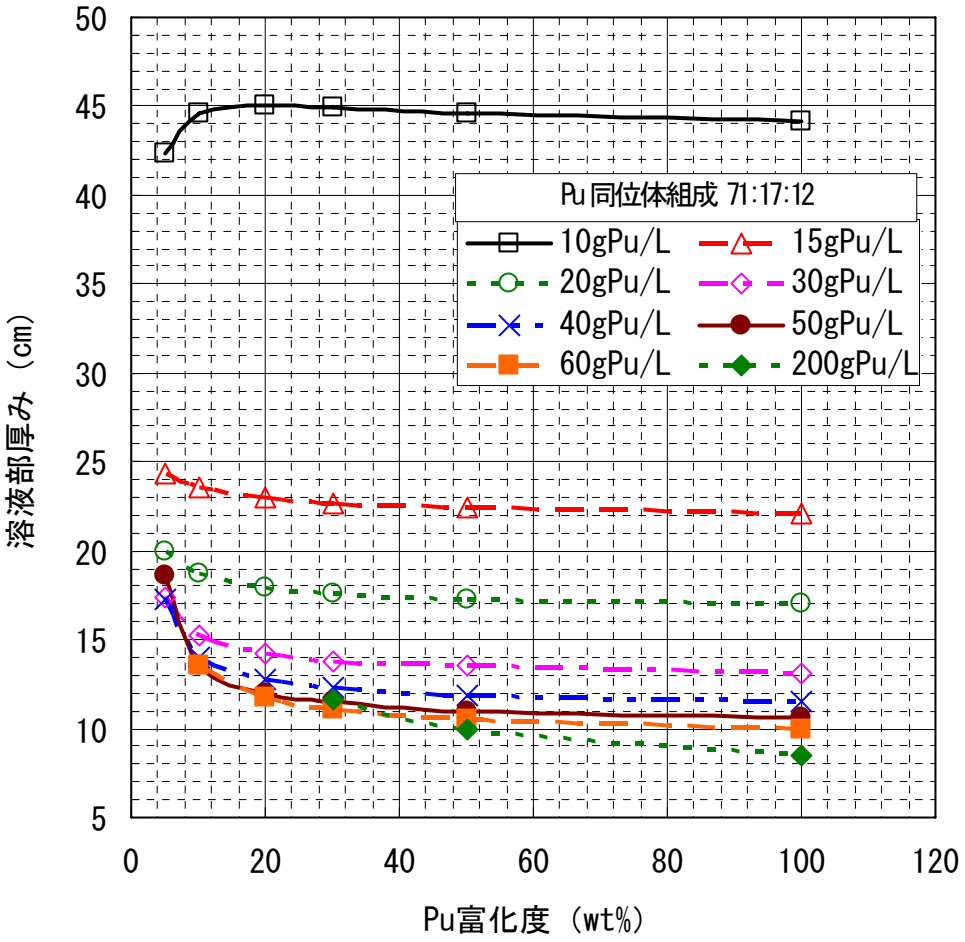
Pu 同位体組成　55:30:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部 高さ ∞
構造材厚 0.3cmSUS
側面 20cm 水反射



Pu 富化度 (wt%)	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部液厚 (cm)			
5	17.3	18.0	19.8	21.9
10	13.6	14.1	15.4	16.9
20	11.4	11.8	12.9	14.1
30	10.5	10.9	11.9	13.0
50	9.7	10.0	11.0	12.0
100	8.5	8.8	9.6	10.6

図 4.2.3.2-4　無限平板槽　単一ユニット　Pu 富化度－全濃度安全溶液部液厚（keff≦0.95）の関係

（U 濃縮度 1.6wt%
溶液部 高さ ∞
構造材厚 0.3cmSUS
側面 20cm 水反射）

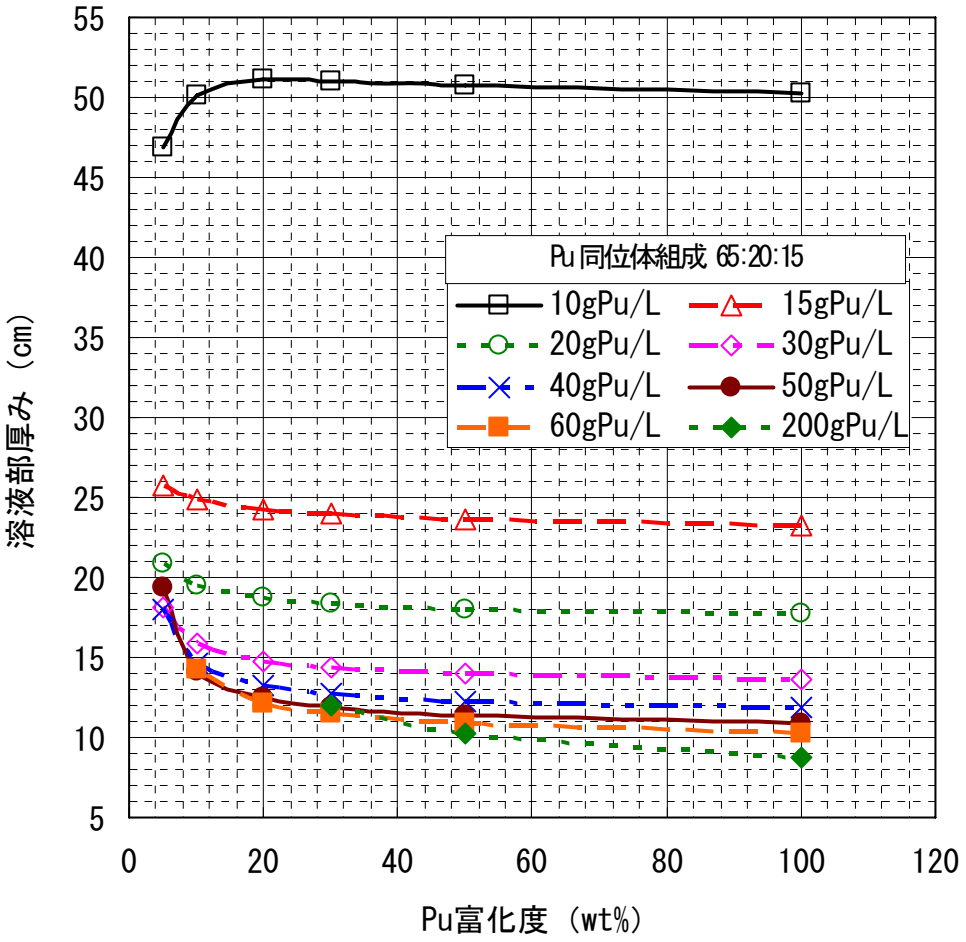


Pu 富化度 (wt%)	Pu 濃度 (g/L)							
	10	15	20	30	40	50	60	200
5	42.4	24.4	20.0	17.4	17.3	18.6		
10	44.6	23.6	18.7	15.2	14.0	13.6	13.6	
20	45.0	23.0	17.9	14.2	12.8	12.0	11.7	
30	44.9	22.7	17.6	13.8	12.3	11.5	11.1	11.6
50	44.6	22.4	17.3	13.5	11.9	11.0	10.5	9.9
100	44.2	22.1	17.0	13.1	11.5	10.6	10.0	8.5

（各 Pu 富化度について、Pu 濃度が 0g/L から溶液部半径が最小値となる濃度までの範囲をプロット）

図 4.2.3.2-5 (1)　無限平板槽　単一ユニット　Pu 富化度－溶液部厚（keff≦0.95）の関係

（Pu 同位体組成　71:17:12、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部 高さ ∞
構造材厚 0.3cmSUS
側面 20cm 水反射）

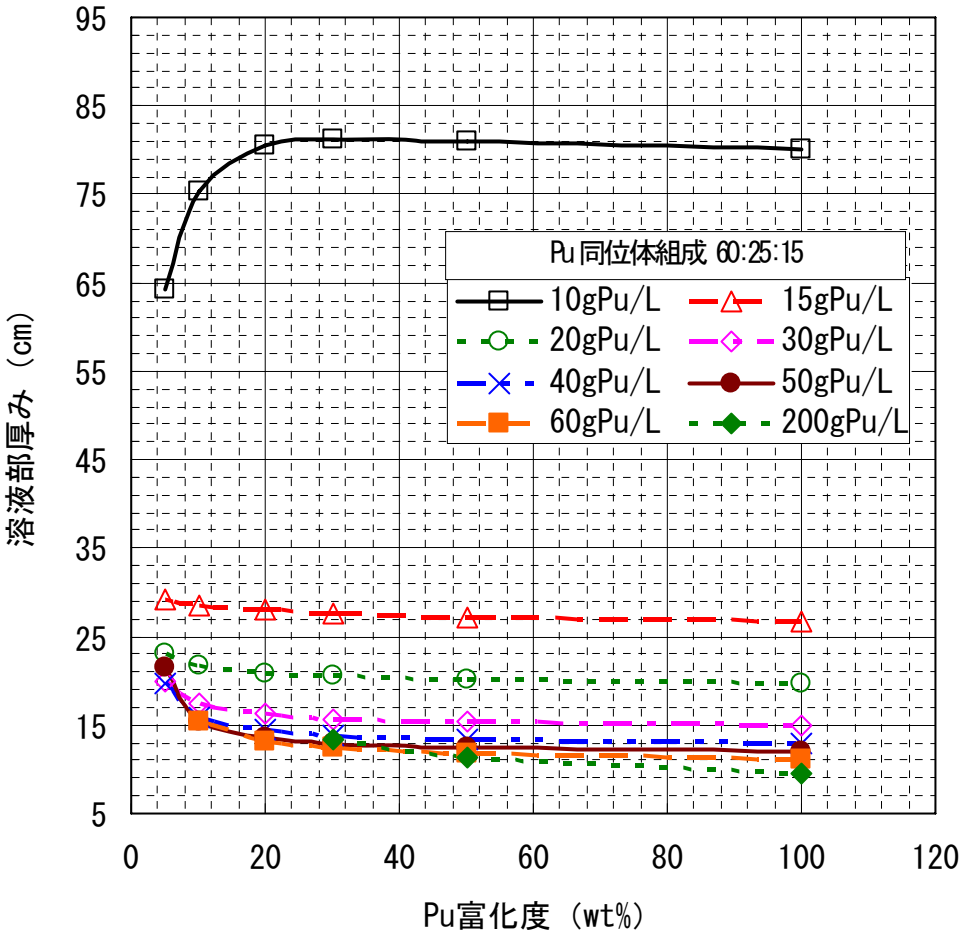


Pu 富化度 (wt%)	Pu 濃度 (g/L)							
	10	15	20	30	40	50	60	200
5	46.9	25.7	20.9	18.1	18.0	19.4		
10	50.1	24.9	19.5	15.9	14.6	14.1	14.2	
20	51.1	24.3	18.7	14.8	13.3	12.5	12.1	
30	51.0	24.0	18.4	14.4	12.8	11.9	11.5	12.0
50	50.7	23.6	18.0	14.0	12.3	11.4	10.9	10.3
100	50.2	23.3	17.7	13.6	11.9	10.9	10.3	8.8

（各 Pu 富化度について、Pu 濃度が 0g/L から溶液部半径が最小値となる濃度までの範囲をプロット）

図 4.2.3.2-5 (2)　無限平板槽　単一ユニット　Pu 富化度－溶液部厚（keff≦0.95）の関係

（Pu 同位体組成　65:20:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部 高さ ∞
構造材厚 0.3cmSUS
側面 20cm 水反射）

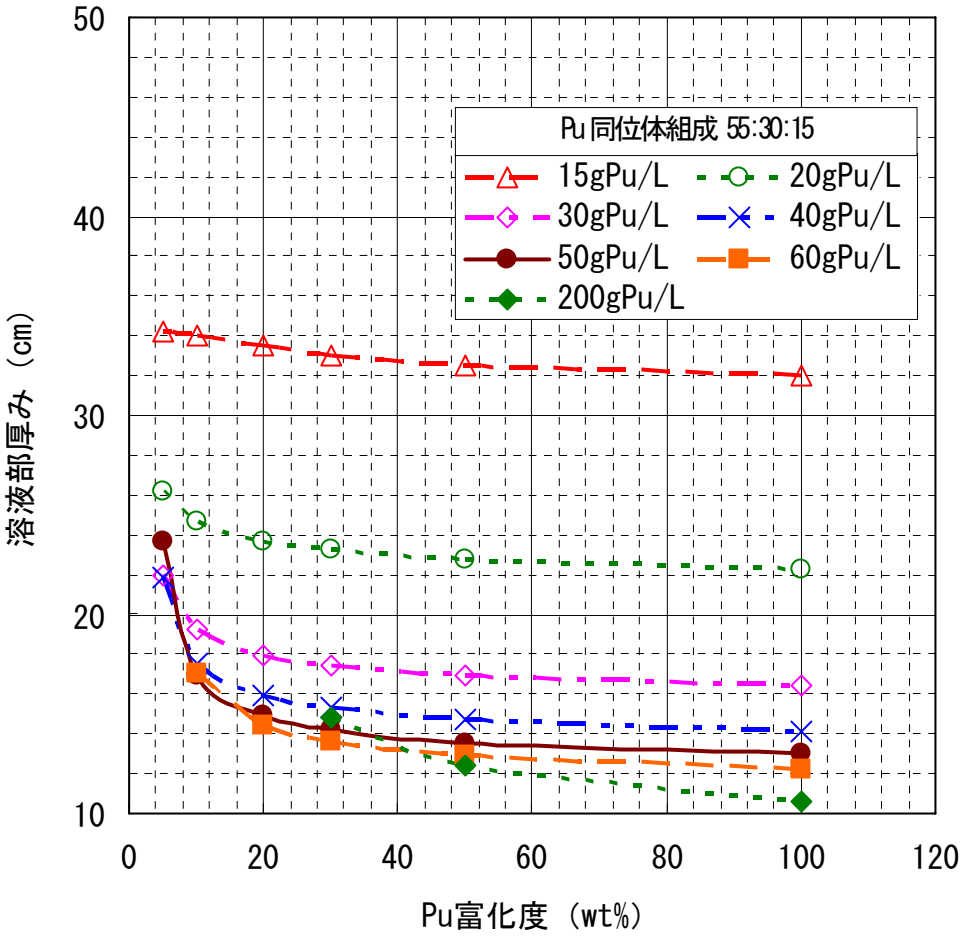


Pu 富化度 (wt%)	Pu 濃度（g/L）							
	10	15	20	30	40	50	60	200
5	64.2	29.2	23.2	19.9	19.8	21.4		
10	75.3	28.6	21.8	17.4	15.9	15.4	15.5	
20	80.5	28.0	20.9	16.2	14.4	13.6	13.2	
30	81.2	27.6	20.5	15.7	13.9	13.0	12.4	13.3
50	81.0	27.2	20.1	15.3	13.4	12.4	11.8	11.3
100	80.1	26.8	19.7	14.9	12.9	11.9	11.2	9.6

（各 Pu 富化度について、Pu 濃度が 0g/L から溶液部半径が最小値となる濃度までの範囲をプロット）

図 4.2.3.2-5 (3)　無限平板槽　単一ユニット　Pu 富化度－溶液部厚（keff≦0.95）の関係

（Pu 同位体組成　60:25:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部 高さ ∞
構造材厚 0.3cmSUS
側面 20cm 水反射）

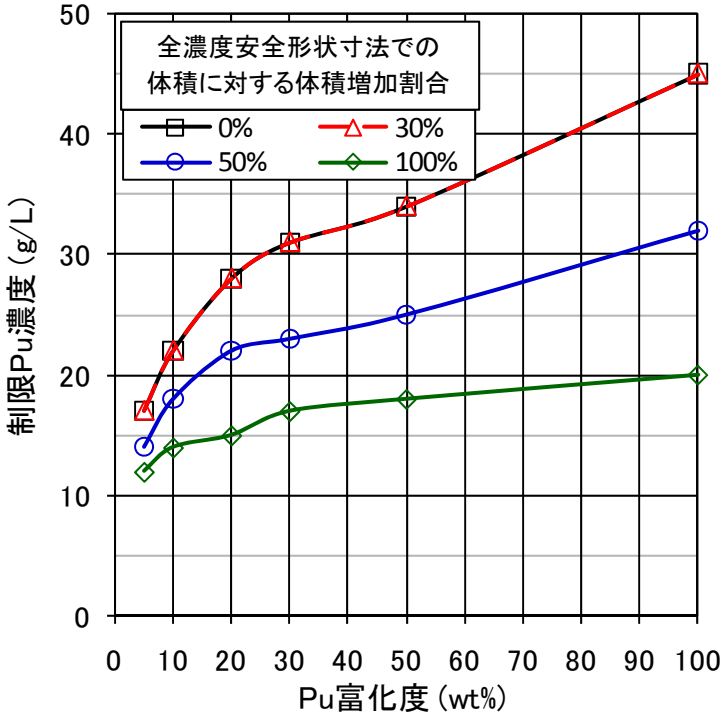


Pu 富化度 (wt%)	Pu 濃度 (g/L)							
	10	15	20	30	40	50	60	200
5	(未計算)	34.2	26.2	22.0	21.9	23.7		
10	∞	34.0	24.7	19.2	17.5	16.9	17.0	
20	∞	33.5	23.7	17.9	15.9	14.9	14.4	
30	∞	33.0	23.3	17.4	15.3	14.2	13.6	14.8
50	∞	32.5	22.8	16.9	14.7	13.5	12.9	12.4
100	∞	32.0	22.3	16.4	14.1	13.0	12.2	10.6

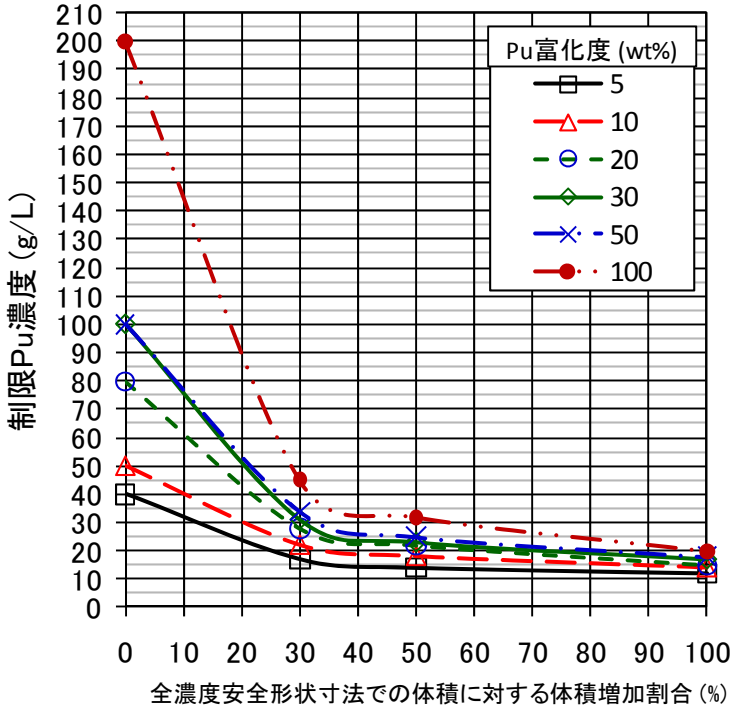
（各 Pu 富化度について、Pu 濃度が 0g/L から溶液部半径が最小値となる濃度までの範囲をプロット）

図 4.2.3.2-5 (4)　無限平板槽　単一ユニット　Pu 富化度－溶液部厚（keff≦0.95）の関係

（Pu 同位体組成　55:30:15、U 濃縮度 1.6wt%
溶液部 高さ ∞
構造材厚 0.3cmSUS
側面 20cm 水反射）



(1) Pu 富化度－制限 Pu 濃度　関係



(2) 体積増加割合－制限 Pu 濃度　関係

図 4.2.3.2-6　無限平板　単一ユニット　全濃度安全形状寸法での体積を
所定の割合だけ増加させるのに必要な制限 Pu 濃度

（Pu 同位体組成 65:20:15、U 濃縮度 1.6wt%、構造材 SUS304 0.3cm 考慮、20cm 水反射）

4.2.3.3 複数ユニットの制限寸法

平板槽を並べて複数配置することを想定し、複数ユニットの計算を行った。平板槽相互の中性子干渉を低減するため、単一ユニットのモデルと異なり、両側に中性性吸収材（0.05cm Cd + 10cm ポリエチレン）を配置したモデルとした。4.2.2.3 項で述べたように、この中性子吸収材により、平板槽は実質上、単一ユニットとみなすことができ、前項の単一ユニットの制限寸法が適用できると考えられる。

従って、以下では、これを確認するための計算を行うにとどめ、前項で行ったような制限寸法を求めることまでは行なわない。

(1) 計算条件

(a) 計算モデル

平板槽溶液部両側に配置する中性子吸収材は、4.2.2.1(4)項に説明した理由により、溶液部との間に空間を設けず溶液部側に密着させた配置とする。なお、溶液部と Cd-ポリエチレンの間に隙間を設けても、無限平板体系なので中性子の漏れはなく、keff への影響はほとんどないと考えられる。

4.2.3.1 項の条件設定と 4.2.3.2 項の単一ユニットの計算条件に対し、唯一、溶液部の外側の条件を、0.3 cm SUS + 20cm 水反射に替えて、2cm SUS 、0.05cm Cd＋10cm ポリエチレンとし、その外側を鏡面反射条件として、平板槽が平行に無限配列したモデルとした。

従って、体系内に空間部がないため、空間水密度ををパラメータとした計算は必要ない。

計算モデルを図 4.2.3.3-1 に示す

(b) 溶液部厚と濃度

3 種類の Pu 同位体組成（5、20、100 wt%）、3 種類の Pu 富化度について、それぞれ 4.2.2.2(1)項の単一ユニットの基本条件での計算の最小溶液部厚とその時の最適濃度を用いた。

(2) 計算結果

(1)の条件で計算した複数ユニットの keff と(1)で得られた単一ユニットの keff とを比較したものを表 4.2.3.3-1 に示す。この表より、複数ユニットの keff について、4.2.2.3(2)項と同様に以下のことが確認できる。

① 計算対象としたいずれの場合でも、keff は 0.95 を下回り、かつ、単一ユニットの keff 以下である。
② Pu 富化度が高いほど、keff は小さくなる （この理由は 4.2.2.3(2)②項参照）

(3) 単一ユニットの制限溶液部厚の複数ユニットへの適用性

(2)の①で確認されたように、<u>単一ユニットの計算条件の溶液部外側を水全反射条件していることに替えて、ユニット間の中性子相互干渉をほぼ遮断できるような中性子吸収材を設置することにより、単一ユニットの制限溶液部厚が適用できる。</u>

表4.2.3.3-1 無限平板（複数ユニット）の空間水密度－keffの関係

Pu 富化度	5wt%	20wt%	100wt%

(1) Pu 同位体組成 71:17:12

溶液部条件 （単一ユニットでの最小液厚と最適 Pu 濃度）	溶液厚 17.3cm 濃度 40gPu/L	溶液厚 11.4cm 濃度 80gPu/L	溶液厚 8.5cm 濃度 200gPu/L
単一ユニット：外側水全反射	0.94834	0.94822	0.94733
複数ユニット：外側 Cd+ポリエチレン	0.91106	0.88385	0.84895

(2) Pu 同位体組成 65:20:15

溶液部条件 （単一ユニットでの最小液厚と最適 Pu 濃度）	溶液厚 18.0cm 濃度 40gPu/L	溶液厚 11.8cm 濃度 80gPu/L	溶液厚 8.8m 濃度 200gPu/L
単一ユニット：外側水全反射	0.94832	0.94747	0.94710
複数ユニット：外側 Cd+ポリエチレン	0.91354	0.88641	0.85319

(3) Pu 同位体組成 60:25:15

溶液部条件 （単一ユニットでの最小液厚と最適 Pu 濃度）	溶液厚 19.8cm 濃度 40gPu/L	溶液厚 12.9cm 濃度 80gPu/L	溶液厚 9.6m 濃度 200gPu/L
単一ユニット：外側水全反射	0.94968	0.94857	0.94689
複数ユニット：外側 Cd+ポリエチレン	0.92078	0.89595	0.86394

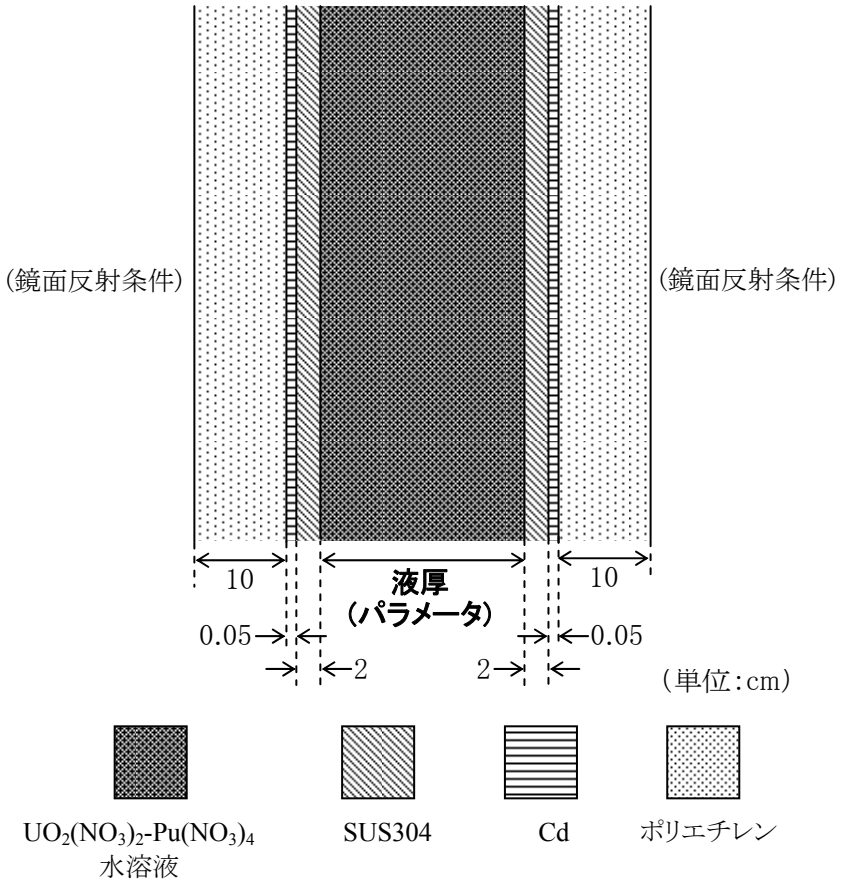


図 4.2.3.3-1 無限平板 複数ユニット 計算モデル

5. まとめ

5.1 本検討の特徴

将来の再処理施設の機器の臨界安全設計に役立てるべく、無限円筒、無限平板、有限円環槽を対象に硝酸 U（濃縮度 1.6wt%）、硝酸 Pu 混合溶液に対する keff（+3 σ）≦0.95 を満たす制限寸法を計算した。本検討の特徴は以下の点である。

- 将来の再処理施設では、軽水炉 U 燃料のみならず、軽水炉 MOX 燃料、さらには高速炉燃料も取り扱うことが考えられることから、系統的に 4 種類の Pu 同位体組成、6 種類の Pu 富化度を設定して計算した。
- これまでの臨界安全ハンドブックにはない中性子吸収材（0.5 cmCd＋10 cm ポリエチレン）を配置した円環槽、平板槽も対象とした。
- Pu 同位体組成、Pu 富化度、Pu 濃度をパラメータとして、利便性を考え多角的な視点でグラフを整理した。

5.2 制限寸法の適用条件

本検討で行った各形状に対する計算条件により、本検討で求められた制限寸法を適用するには、以下の条件を満たしていなければならない。

(a) 無限円筒半径

（単一ユニット）

- 構造材肉厚　0.3cm 以上

(b) 有限円環槽溶液部厚

（単一ユニット）

- 溶液部内側の半径　100cm 以上、溶液部高さ　400cm 以下
  （ただし、（溶液部高さ）／（溶液部内側半径）≦4 であれば適用可能と考えられる）
- 溶液部内側に十分な吸収能力をもつ中性子吸収材を配置
- 中性子吸収材　Cd 厚み　0.05cm 以上、ポリエチレン厚み 10cm 以上
- 溶液部内側の SUS と中性子吸収材の間の間隙　10cm 以下
- 溶液部内側の SUS 肉厚 2cm 以下、溶液部外面の SUS 厚 0.3cm 以上
- Cd をなくし、ポリエチレンのみとした場合の制限寸法の減少量は計算した条件の範囲では 0.2～0.6cm であり、1cm 減少させることで適用可能である。
- 計算対象とした有限円環槽は、保守的な設定として溶液部内面と中性子吸収材との間に間隙を設けている。この間隙に水の浸入を仮定すると（水密度＞0.5g/cm^3）、水による反射効果が増大するため、間隙をボイドとし溶液部外側を水全反射条件とした keff を最大で 1%Δk 超える場合があっ

た。従って、機器の水没が想定される場合には、本検討で与えた制限寸法は厳密には適用できないが、水没を考慮した場合の制限寸法の減少量は高々0.2 cm 程度であり、影響は小さい。

(複数ユニット)

・ 溶液部外側にも中性子吸収材（Cd 厚み　0.05cm 以上、ポリエチレン厚み 10cm 以上）を配置しユニット間の相互干渉を遮断すれば、単一ユニットの制限寸法を適用できる。

(c) 無限平板溶液部厚

（単一ユニット）

・ 構造材肉厚　0.3cm 以上

(複数ユニット)

・ 溶液部外側にも中性子吸収材（Cd 厚み　0.05cm 以上、ポリエチレン厚み 10cm 以上）を配置しユニット間の相互干渉を遮断すれば、単一ユニットの制限寸法を適用できる。

以上の条件から外れる場合でも、その程度が小さい場合には、「条件設定」の項で、設定した条件の変化の影響について検討しているので、その影響を考慮に入れて補正することで適用することも可能と考えられる。

なお、本検討で与えた制限寸法は 0.1cm 単位で与えている。計算ではできるだけ濃度による keff の変化をグラフで確認し、できるだけ最適濃度（keff が最大値となる濃度）近辺の濃度を用いて計算しているが、計算量の節約のため、最適濃度探索の刻み幅を数十 g/L から 100g/L 単位でとっている。このため、必ずしも最適濃度そのものにはなっていない。これによる誤差が数 mm あると考えられる。また、円環槽ではモンテカルロ計算コードを用いており、最大 0.5 cm 程度の誤差があるものと考えられる（4.2.2.2(2)項参照）。

また、本計算は、SCLALE 6+コードシステム、核データライブラリは添付された最新版である ENDF/B-VII 238 群ライブラリを用いたが、これに関する計算精度の検証は実施していないことを断っておく。本検討で与えたデータを正式に採用する場合には、計算精度の検証が必要である。あくまで、参考情報として使用すべきでものある。

5.3 得られた主要な知見

本検討の結果から、得られる主要な知見を以下に列記する。

5.3.1 一般事項

・ 計算対象とした有限円環槽は、中性子吸収材を内側に配置して円環内面側の中性子相互干渉が十分低減されたものであるため、制限溶液部厚は無限平板のものとほぼ等しい。本検討条件では円環槽の制限溶液部厚が平板のものより若干（0.2～0.7cm）大きい結果となり、Pu 富化度の影響はみられなかった（表 5.3.1-1 の(1)）。従って、簡易的に、無限平板の制限厚を本検討対象とした円環槽に適用することが可能である。

・ 一方、有限円環槽と無限円筒の制限寸法の差（表 5.3.1-1 の(2)）は、Pu 富化度の増加とともに小さくなり、円環槽の方が+1.3～-0.5cm 大きい結果となった。この差は平板槽との差より大きいが、割合としては 10%以下であり大きいものではない。

・ 計算対象とした有限円環槽は、Cd の中性子吸収効果を高めるために 10 cm 厚のポリエチレンを並置させている。円環内面に配置しているので、対面合わせて 20 cm 以上の厚さとなり、ポリエチレンだけでも相当の中性子隔離能力をもつ。Cd をなくしポリエチレンのみとした場合の制限寸法の減少量は、条件に応じて 0.2～0.6 cm となり、割合として 5% 以下である。このようにポリエチレンの厚みを十分確保できる場合は Cd は必須ではないと考えられる。

5.3.2 臨界安全管理方法の選定の際の配慮事項

(a) 全濃度安全形状寸法

いずれの条件においても、Pu 富化度が 0 から 20～30 wt%程度までは制限寸法は急激に減少するが、それ以上ではなだらかに減少する。Pu 同位体組成 65:20:15 の場合を例にとると、本検討条件では、Pu 富化度が 20wt%（30wt%）～100wt%の範囲で全濃度安全形状寸法は以下のようになった。おおよそ 12～9cm の範囲と捉えればよい。

無限平板　溶液部厚　12.1（11.5）～9.9cm （図 4.2.1.2-4）
有限円環槽　溶液部厚　12.4（11.5）～9.5cm （図 4.2.2.2-4）
無限平板　溶液部厚　11.8（10.9）～8.8cm （図 4.2.3.2-4）

(b) Pu 富化度と全濃度安全形状寸法 （図 4.2.1.2-4、図 4.2.2.2-4、図 4.2.3.2-4 参照）

Pu 富化度 100 wt%から 20～30 wt%までの範囲では、Pu 富化度の減少とともに制限寸法は緩やかに増加し、Pu 富化度がそれ以下に減少してくると制限寸法は急激に増加する。従って、全濃度安全形状管理対象機器の容量増加を目的に、Pu 富化度を制限（管理）しようとする場合、Pu 富化度管理値を 20～30 wt%以上に設定することは、100%Pu の場合の制限寸法と大差なくなる。例えば、Pu 富化度を 100 wt%から 30 wt%に下げても、制限寸法増加による体積増加割合は、形状にもよるが 2～3 割程度にすぎない。Pu 富化度を 10wt%まで下げると体積増加割合は 6～10 割となる。

Pu 富化度管理の適用に際しては、容量増加のメリットと Pu 富化度管理導入のために要求される事項（組成確認等）とのバランスを考慮すべきである。

(c) Pu 濃度と制限濃度安全形状寸法 （図 4.2.1.2-3、図 4.2.2.2-3、図 4.2.3.2-3 参照）

最適 Pu 濃度は Pu 富化度の増加とともに増加し 30～160 g/L の範囲にある。また、Pu 濃度-制限寸法の関係を表す曲線の極小値近辺は Pu 富化度の増加とともによりフラットになり、Pu 濃度が 30～40 g/L 以上の範囲では、Pu 濃度を低下させたときの制限寸法の増加量は小さい。従って、容量増加を目的に Pu 濃度制限（管理）しようとする場合、Pu 濃度を 30～40 g/L 以下に制限しないと、相当量の容量増加は望めない。一方、図から分かるように、Pu 濃度を 30～40 g/L 以下の範囲まで制限すると、制限寸法の増加（容量増加）は顕著である。

表 5.3.1-1　各形状の全濃度安全制限寸法の差

(1) 円環槽溶液部厚と平板槽溶液部厚の差（図 4.2.2.2-4 と図 4.2.3.2-4 の比較）

Pu 富化度（wt%）	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部液厚の差（円環槽-平板槽）(cm)			
5	0.3	0.3	0.2	0.2
10	0.5	0.5	0.5	0.5
20	0.6	0.6	0.5	0.6
30	0.6	0.6	0.6	0.5
50	0.6	0.5	0.5	0.5
100	0.7	0.7	0.7	0.6

(2) 円環槽溶液部厚と円筒槽半径の差（図 4.2.2.2-4 と図 4.2.1.2-4 の比較）

Pu 富化度（wt%）	Pu 同位体組成			
	71:17:12	65:20:15	60:25:15	55:30:15
	溶液部液厚の差（円環槽-円筒槽）(cm)			
5	1.3	1.5	1.9	1.3
10	0.6	0.7	1.0	1.3
20	0.2	0.3	0.4	0.8
30	-0.1	0.0	0.2	0.3
50	-0.2	-0.2	0.0	0.2
100	-0.5	-0.4	-0.3	-0.1

参考文献

(1) 科学技術庁核燃料規制課編, 臨界安全ハンドブック, 1988

(2) 奥野浩, 須山賢也 他, 臨界安全ハンドブック・データ集第2版, JAEA-Data/Code 2009-010, 2009

(3) Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Handbuch zur Kritikalität, 1985

(4) Atlantic Richfield Hanford Co., Criticality Handbook, ARH-600, 1968

(5) ORNL, SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluations, ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vols. I–III, January 2009. Available from Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-750.

(6) 清水義雄, 野尻一郎 他, MOX 取扱施設臨界安全ガイドブック, PNC TN1410 96-074, 1996

(7) 日本原燃㈱, 再処理事業指定申請書　添付書類六

(8)日本原子力研究所, 臨界安全ハンドブック第2版, JAERI　1340

(9) 日本原子力研究開発機構, 再処理施設事業指定申請書 添付書類四

(10) Atlantic Richfield Hanford Co., Criticality Handbook, ARH-600, VI. Poisoned Sytems, 1968

(11) Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Handbuch zur Kritikalität, 1985

(12) 住友金属鉱山㈱, 分離施設の臨界安全解析, 1991
および　三菱マテリアル㈱, 精製施設の臨界安全解析, MMC-9101, 1991

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の）　1	1
比透磁率[b]	（数字の）　1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X 線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St\ =1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu\ =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています