

JAERI-Data/Code
2003-001



JP0350047



銀媒体電解酸化法による
MOX溶解シミュレーションコードの開発
(受託研究)

2003年3月

木田 孝・梅田 幹・杉川 進

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

銀媒体電解酸化法による MOX 溶解シミュレーションコードの開発
(受託研究)

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター安全試験部

木田 孝・梅田 幹・杉川 進

(2003年1月21日受理)

燃料サイクル安全工学研究施設 (NUCEF) では、臨界実験で使用する硝酸プルトニウム溶液を調製するために、銀媒体電解酸化法によるウラン・プルトニウム混合酸化物 (MOX) 粉末の溶解を計画している。この溶解運転の支援のために、MOX 溶解シミュレーションコードの開発を行なった。本報は、開発したシミュレーションコードの概要、実験データとの比較及び溶解速度に及ぼす MOX 粉末溶解パラメータについてまとめたものである。

本コードは、 Ag(II) イオンによる PuO_2 粉末溶解に対する Zundelevich のモデルに基づいて作成し、 Ag(II) イオンの収支式に亜硝酸による影響を加えるとともに、MOX 粉末の表面積は粒径分布により算出する方式を採用した。また、コードの妥当性を確認するために、実験データとの比較を行なった。この結果、本コードにおいて溶解速度定数等のパラメータに適切な値を用いることで、溶解挙動を良く模擬できることを確認した。また、溶解速度に及ぼす影響が最も大きいパラメータは、MOX 粉末粒径であることが判明した。

本報告書は、電源開発促進対策特別会計法に基づき、原研が文部科学省から委託されて実施した「再処理施設臨界安全技術開発」の研究成果の一部である。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

Development of Simulation Code for MOX Dissolution
using Silver-mediated Electrochemical Method
(Contract Research)

Takashi KIDA, Miki UMEDA and Susumu SUGIKAWA

Department of Safety Research Technical Support
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 21, 2003)

MOX dissolution using silver-mediated electrochemical method will be employed for the preparation of plutonium nitrate solution in the criticality safety experiments in the Nuclear Fuel Cycle Safety Engineering Research Facility (NUCEF). A simulation code for the MOX dissolution has been developed for the operating support. The present report describes the outline of the simulation code, a comparison with the experimental data and a parameter study on the MOX dissolution.

The principle of this code is based on the Zundelovich's model for PuO_2 dissolution using $\text{Ag}(\text{II})$. The influence of nitrous acid on the material balance of $\text{Ag}(\text{II})$ is taken into consideration and the surface area of MOX powder is evaluated by particle size distribution in this model. The comparison with experimental data was carried out to confirm the validity of this model. It was confirmed that the behavior of MOX dissolution could adequately be simulated using an appropriate MOX dissolution rate constant. It was found from the result of parameter studies that MOX particle size was major governing factor on the dissolution rate.

Keywords : Simulation, MOX, Dissolution, Oxidation, $\text{Ag}(\text{II})$, Reaction Kinetics,
Nitrous Acid, Particle Size

This work was carried out by Japan Atomic Energy Research Institute under the auspices of Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology.

目 次

1	はじめに	1
2	シミュレーションコードの概要	2
2.1	溶解原理及び適用モデルの特徴	2
2.2	シミュレーションコードの構成	3
3	実験データとの比較	11
3.1	Ag (II) イオンの生成実験との比較	11
3.2	PuO ₂ 溶解実験との比較	11
3.3	UO ₂ 溶解実験との比較	12
3.4	U ₃ O ₈ 溶解実験との比較	12
4	溶解速度に及ぼす MOX 粉末溶解パラメータ解析	14
5	おわりに	15
	謝 辞	15
	参考文献	16

Contents

1	Introduction	1
2	Outline of Simulation Code	2
2.1	Dissolution Mechanism and Characteristics of Model	2
2.2	Structure of Code	3
3	Comparison with Experimental Data	11
3.1	Comparison with Experimental Data of Ag(II) Generation	11
3.2	Comparison with Experimental Data of PuO ₂ Dissolution	11
3.3	Comparison with Experimental Data of UO ₂ Dissolution	12
3.4	Comparison with Experimental Data of U ₃ O ₈ Dissolution	12
4	Parameter study on MOX Dissolution Rate	14
5	Conclusion	15
	Acknowledgement	15
	References	16

This is a blank page.

1.はじめに

日本原子力研究所東海研究所燃料サイクル安全工学研究施設 (NUCEF) では、定常臨界実験装置 (STACY) において、硝酸プルトニウム溶液を用いたプルトニウム臨界実験を計画している¹⁾。この臨界実験で使用する溶液燃料は、核燃料調製設備に設置されている MOX 溶解設備において、ウラン・プルトニウム混合酸化物 (MOX) 粉末を溶解することにより調製する。硝酸に対して難溶性である MOX 粉末を溶解するため²⁾、NUCEF における MOX 粉末の溶解法には、銀媒体電解酸化法を採用することとしている³⁾。同法による溶解は、沸騰硝酸溶液による加熱溶解に比べて、MOX 粉末の性状に依存することなく室温下において短時間で完全に溶解させることが可能であり、NO_x 等のオフガス発生量が少ないという特徴も有する。また、同法はフランスにおいて、MOX 燃料加工工場から生じる MOX ダーティスクラップの溶解にも応用されている⁴⁾。

NUCEF の MOX 溶解設備の運転にあたって、MOX 粉末供給時間、供給量等の最適な運転条件を推定するために、銀媒体電解酸化法による MOX 溶解シミュレーションコードの開発を行なった。本シミュレーションコードは、Zundelevich が提案している Ag(II)イオンによる PuO₂粉末の溶解モデル⁵⁾を基礎とし、MOX 粉末に適用できるように拡張したものであり、Zundelevich モデルでの Ag(II)イオンの収支式に亜硝酸による影響の考慮を加えた。また、溶解粉末の対象を PuO₂粉末のみから MOX 粉末 (PuO₂粉末、UO₂粉末、U₃O₈粉末) の溶解に対して適用できるように拡張するとともに、MOX 粉末の表面積は、粉末の粒径分布を考慮し、粉末が球形であると仮定して算出することとした。

次に、Ag(II)イオン生成実験および PuO₂粉末、UO₂粉末、U₃O₈粉末の溶解実験⁶⁾の結果とシミュレーションコードによる計算結果との比較を行ない、MOX 粉末 (PuO₂粉末、UO₂粉末、U₃O₈粉末) の溶解速度定数の算出を行なうとともに、モデルの妥当性の確認を行なった。また、溶解速度に影響を及ぼす MOX 粉末溶解パラメータについての解析を行なった。

2.シミュレーションコードの概要

2.1 溶解原理及び適用モデルの特徴

銀媒体電解酸化法による PuO_2 粉末溶解の原理を Fig.2.1 に示す。同法は、陽極液（硝酸銀）と陰極液（硝酸）とを隔膜で仕切った電解槽を用い、電解により生成させる Ag(II) イオンの強い酸化力を利用して、硝酸溶液に対して難溶性の PuO_2 を PuO_2^{2+} に酸化することによって溶解する方法である。この酸化反応は敏速であり、電解槽内での PuO_2 粉末溶解反応の律速段階は、 Ag(II) イオンの生成供給であると考えられる⁵⁾。このことから Zundelovich は、 Ag(II) イオンの収支式を計算モデルの基本式として用いることにより、電解槽における PuO_2 粉末の溶解挙動を評価している⁵⁾。この Ag(II) イオンの収支式は、陽極表面での電解生成、 PuO_2 溶解による消費及び溶液中での水との反応による消費を数式化したものである。

本シミュレーションコードのモデルの作成に当たって、Zundelovich が提案している Ag(II) イオンによる PuO_2 粉末溶解モデルを基礎として検討を行った。その結果、MOX 粉末の溶解挙動評価に適用させるために、本モデルには以下のような点を考慮した。

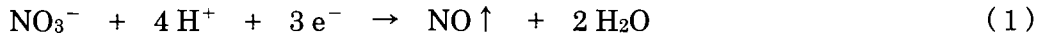
- ① 溶解対象粉末が PuO_2 粉末のみである Zundelovich モデルに、 UO_2 粉末及び U_3O_8 粉末を加えることにより、MOX 粉末溶解への適用を図った。ここで、ウラン酸化物の化学形態を UO_2 粉末及び U_3O_8 粉末と仮定したのは、NUCEF で使用する MOX 粉末の製造時の熱処理条件、O/M 比及び X 線回析等からの判断による。
- ② 溶解中の Ag(II) イオンは、 PuO_2 の酸化や水との還元反応によって消費されるほかに、陰極側の硝酸の分解反応によって生成し、隔膜から陽極側へ浸出する亜硝酸によっても還元され消費される。この Ag(II) イオンの亜硝酸による還元反応は、Zundelovich モデルには考慮されていないが、より正確な Ag(II) イオン収支計算を行なうために、本モデルの Ag(II) イオン収支式に取り入れることにした。
- ③ Zundelovich モデルでは、 Ag(II) イオンによる粉末の酸化反応に伴う溶解は、粉末の粒子表面で生じていると考え、表面での反応が律速であると仮定して、溶解速度を粉末表面積及び Ag(II) イオン濃度から算出している。ここで、粉末径は均一であると仮定し表面積の算出している。ただし、一般的に粉末は粒径分布を持つことから、本モデルではこの粒径分布を設定し、表面積を算出することとした。また、粒径分布を設定することにより、粉末を連続供給した場合の計算を可能とした。

2.2 シミュレーションコードの構成

本シミュレーションコードは、Fig.2.2 のフローダイアグラムに示すように、硝酸濃度計算（計算1）、亜硝酸濃度計算（計算2）、溶液体積計算（計算3）、MOX 粉末粒度分布計算（計算4）、及び Ag（II）イオン濃度計算（計算5）から構成される。以下に、各計算ステップで考えている化学反応式とその計算式を示す。なお、本モデルでは、陽極液及び陰極液は完全に混合されている状態にあり、各々の濃度及び温度は均一であると仮定する。

（計算1）陰極：硝酸濃度計算

陰極側では電極反応により硝酸が分解される。この反応を次式に示す。



式（1）は式（4）及び式（6）で表される2つの素反応からなっており、式（4）に示す中間生成物である亜硝酸の濃度計算については（計算2）で行なう。式（1）の分解反応による硝酸の減少と陰極液追加による硝酸増加を考慮して、陰極での硝酸収支を取る。陰極硝酸濃度 $C(t)$ [mol/L] は次式により求めることができる。

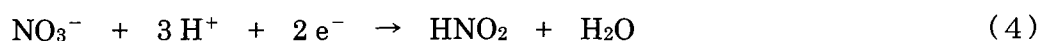
$$C(t + \Delta t) = C(t) + \frac{dC(t)}{dt} \times \Delta t \quad [\text{mol/L}] \quad (2)$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{1}{V_c} \left\{ -QC(t) + QC_{\text{feed}} - \frac{4I}{3F} + \frac{I \times t_{\text{H}^+}}{F} \right\} \quad [\text{mol/L/s}] \quad (3)$$

$C(t)$: 時間 t での陰極硝酸濃度	[mol/L]
V_c	: 陰極液体積	[L]
Q	: 陰極液の追加硝酸流量	[L/s]
C_{feed}	: 陰極液の追加硝酸濃度	[mol/L]
I	: 通電電流	[A]
F	: ファラデー定数 (= 96500)	[C]
t_{H^+}	: 水素イオン輸率	[·]
Δt	: タイムステップ時間	[s]

(計算2) 陰極：亜硝酸濃度計算(計算2-1) 亜硝酸生成反応

陰極側での硝酸分解反応による亜硝酸の生成反応を次式に示す。

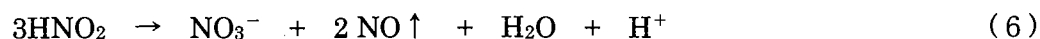


式(4)の反応は、式(1)の反応の中間生成物である亜硝酸の生成を示す素反応である。実際に生じる亜硝酸の増加量は、式(1)での硝酸分解量と等 mol である。よって、陰極亜硝酸濃度の硝酸分解による濃度増加分は、次式で求めることができる。

$$\frac{1}{V_c} \times \frac{4I}{3F} \times \Delta t \quad [\text{mol/L}] \quad (5)$$

(計算2-2) 亜硝酸分解反応

式(4)で生じた亜硝酸の一部は、さらに分解して NO ガスにもなりうる。この反応を次式に示す。



この分解反応の速度 D [mol/L/s] は、次式により求めることができる⁷⁾。ここで、 $q(T(t))$ は、陰極側での溶液表面の開放面積あたりの亜硝酸分解反応速度を示すために必要な係数である。

$$D = \frac{C_{\text{NC}}(t) \times q(T(t)) \times A}{60} \quad [\text{mol/L/s}] \quad (7)$$

$C_{\text{NC}}(t)$: 時間 t での陰極亜硝酸濃度	[mol/L]
$T(t)$: 時間 t での溶液温度	[K]
A	: 溶液表面の開放面積	[cm ²]

式(7)の係数 $q(T(t))$ について、深澤らは 30℃ から 90℃ の硝酸において亜硝酸分解速度の温度依存性を確認する実験を行い、この係数を決定している⁷⁾。しかし、本モデルでは NUCEF での銀媒体電解酸化法による MOX 溶解を対象としており、30℃ 以下の亜

硝酸の挙動を把握することが必要である。深澤らの報告によると、30℃から90℃では、係数 $q(T(t))$ の対数と温度の逆数は直線関係にある。この係数 $q(T(t))$ を、30℃以下の硝酸に対して外挿し、本モデルでの亜硝酸濃度計算に適用することとした。係数 $q(T(t))$ を次式に示す。

$$q(T(t)) = \exp\left(-\frac{1}{0.009 \times T(t)} - 0.44\right) \quad [\text{L} / \text{cm}^2 / \text{min}] \quad (8)$$

以上より、式(5)及び式(7)から、陰極亜硝酸濃度は、次式により求めることができる。

$$C_{\text{NC}}(t + \Delta t) = C_{\text{NC}}(t) + \left\{ \frac{1}{V_c} \times \frac{4I}{3F} - D \right\} \times \Delta t \quad [\text{mol} / \text{L}] \quad (9)$$

(計算3) 陽極：溶液体積計算

陽極液の体積増加量は、陰極液の隔膜からの浸出量とオーバーフロー量より決定する。ただし、本モデルでのこの増加量は陰極側への追加硝酸流量と等しいと仮定する。よって次式により、陽極液の体積を求めることができる。

$$V_p(t + \Delta t) = V_p(t) + Q \times \Delta t \quad [\text{L}] \quad (10)$$

$V_p(t)$: 時間 t での陽極液体積 $[\text{L}]$

(計算4) 陽極：MOX粉末の各粉末 (PuO₂, UO₂, U₃O₈) に対する粒径分布計算

NUCEF で使用する MOX 粉末 (PuO₂ 粉末、UO₂ 粉末、及び U₃O₈ 粉末) の粒径分布測定データから、その粒径分布は対数正規分布に沿うことが分かっている。よって、本モデルでは、MOX 粉末のメジアン径、幾何標準偏差、最大粒子径の各データから、各粉末の基準対数正規分布を設定する。その結果を、後述の MOX 粉末と Ag(II)イオンとの溶解反応計算における粉末表面積の算出に用いる。

MOX 粉末の溶解によって減少する粒径は、粉末のデータにより作成する粒径分布を 100 個のメッシュに区切って表現する。溶解による粒径の減少分を考慮し、新たな粒径分布を再設定し、次のタイムステップでの計算に使用する。また、溶解中に再投入する MOX 粉末

の粒径分布を考慮し、新たな粒径分布を再設定することにより、MOX 粉末の連続的な供給に対する経時的な変化の計算を可能とする。対数正規分布関数の式を次式に示す。

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad (11)$$

$$z = \frac{\ln(x) - \mu}{\sigma} \quad (12)$$

- f : 対数正規分布関数
 x : 粒径
 μ : $\ln(x)$ の平均値
 σ : $\ln(x)$ の標準偏差

(計算5) 陽極: Ag(II)イオン濃度計算

(計算5-1) Ag(II)イオンの陽極表面での電解生成反応

Ag(II)イオンの陽電極表面での電解生成反応を次式に示す。



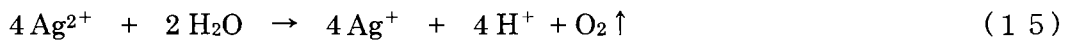
式(13)のAg(II)イオンの電解生成反応速度は、次式で求めることができる。

$$R_{\text{gen}} = \frac{e I}{F} \quad [\text{mol/s}] \quad (14)$$

- e : 電解効率 [-]

(計算5-2) Ag(II)イオンと水との反応

陽極液中で、Ag(II)イオンが水によって還元される反応を次式に示す。



式(15)の還元反応速度は、次式で求めることができる。

$$R_{\text{H}_2\text{O}} = V_p(t) \times k_{\text{H}_2\text{O}} \times [\text{AgII}(t)]^2 \quad [\text{mol/s}] \quad (16)$$

$R_{\text{H}_2\text{O}}$: Ag(II)イオンの H ₂ O による還元反応速度	[mol / s]
$V_p(t)$: 時間 t での陽極液体積	[L]
$k_{\text{H}_2\text{O}}$: Ag(II)イオンと水の反応速度定数	[L / mol / s]
$[\text{AgII}(t)]$: 時間 t での陽極液 Ag(II)濃度	[mol / L]

$$k_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{4\alpha}{1 + \beta[\text{H}^+]^2[\text{AgI}(t)]} \times \gamma \quad [\text{L} / \text{mol} / \text{s}] \quad (17)$$

$$\alpha = \exp\left[-10.919 + \frac{7921.3}{1.987 \times T(t)}\right] \quad [\text{L} / \text{mol} / \text{s}] \quad (18)$$

$$\beta = \exp\left[-48.254 + \frac{32764}{1.987 \times T(t)}\right] \quad [\text{L}^3 / \text{mol}^3] \quad (19)$$

$[\text{AgI}(t)]$: 時間 t での陽極液 Ag(I)濃度	[mol / L]
$[\text{H}^+]$: 陽極液水素イオン濃度	[mol / L]
γ	: 補正係数	[-]

式(15)は、Ag(II)イオンと水の反応とともに生じる Ag(II)イオンの不均化反応等の素反応をまとめた、見かけ上の反応式である。その各々の素反応を考慮して、式(16)の Ag(II)イオンと水の反応速度定数 $k_{\text{H}_2\text{O}}$ を決定し、還元反応速度を算出する⁸⁾。また、この還元反応速度は、溶液温度 $T(t)$ に依存する係数であり、Ag(II)イオンの還元反応は溶液温度に影響を受ける。

Poらは、Ag(II)イオン濃度が 10^{-4} [mol / L] 付近での、水による還元反応実験から、式(17)および式(18)、式(19)に示す Ag(II)イオンと水の反応速度定数 $k_{\text{H}_2\text{O}}$ を決定している⁸⁾。しかし、本モデルでは、NUCEFでの銀媒体電解酸化法による MOX 溶解を対象としており、より高い Ag(II)イオン濃度での、還元反応速度の算出が必要である。また、本モデルでは、Ag(II)イオンの電解生成中での、水による還元反応を評価する必要がある。従って、本モデルではこの係数を外挿して用いることとし、これらの影響を考慮するために、補正係数 γ を加えて適用することとした。

(計算 5-3) Ag(II)イオンと亜硝酸との反応

陽極液中で、Ag(II)イオンが亜硝酸によって還元される反応を次式に示す。



(計算 3) と同様に、陰極側への追加硝酸流量が陽極液の体積増加量に等しいと仮定すると、その流量に陰極亜硝酸濃度を乗じたものが、陰極側から陽極側へ移行する亜硝酸の移行速度となる。式 (20) の反応は、酸化力の強い Ag(II)イオンと不安定な亜硝酸との反応であるので、陰極側から陽極側へ移行した全ての亜硝酸が、速やかに Ag(II)イオンを還元させると仮定できる。この仮定により、亜硝酸の移行速度は、すなわち還元反応速度とすることができる。ただし、この陰極側から陽極側へと移行した亜硝酸は、全てが Ag(II)イオンと反応するのではなく、水との反応でも消費される。この水との反応による亜硝酸の消費量を考慮するための係数として、陽極側での亜硝酸残存率 k_{ext} を加えた。

亜硝酸による Ag(II)イオンの還元反応速度を次式に示す。

$$R_{\text{HNO}_2} = k_{\text{ext}} \times C_{\text{NC}}(t) \times Q \quad [\text{mol} / \text{s}] \quad (21)$$

R_{HNO_2}	: Ag(II)イオンの HNO ₂ による還元反応速度	[mol / s]
k_{ext}	: 陽極側での亜硝酸残存率	[-]

ここで、NUCEF での MOX 溶解条件においては、 $k_{\text{ext}}=0.34$ であることを実験により確認した。

(計算 5-4) Ag(II)イオンと MOX 粉末との反応

硝酸溶液中において、PuO₂ 粉末は Ag(II)イオンによる 2 段階の酸化反応を経て溶解される⁵⁾。



式 (22) 及び (23) を総合すると、以下の式で示すことができる。



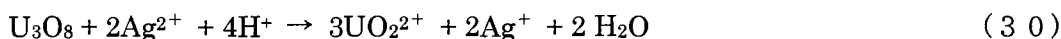
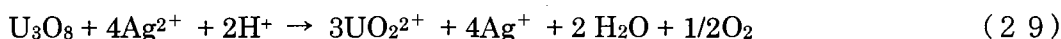
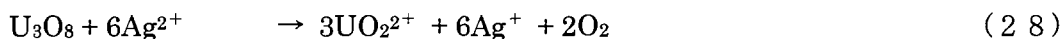
式(24)の酸化反応はPuO₂粉末の表面で生じているので、この反応速度は粉末表面積及びAg(II)イオン濃度で表す⁵⁾。粉末表面積の算出には、(計算4)で設定した粒径分布を用いる。粒径分布を100個のメッシュに区切り、各メッシュ中の粉末の粒径と質量から、各メッシュでの粉末表面積を算出する。ここで、PuO₂粉末は球形であると仮定する。なお、NUCEFでのMOX溶解条件では、硝酸濃度および溶解温度がほぼ一定になるように制御を行なうので、PuO₂粉末のAg(II)イオンによる酸化反応速度定数つまり溶解速度定数は一定であるものとした。Ag(II)イオンとPuO₂粉末との反応速度を次式に示す。

$$R_{\text{PuO}_2} = \frac{dM_{\text{PuO}_2}}{dt} = k_{\text{PuO}_2} \times \sum S_{\text{PuO}_2_i} \times [\text{AgII}(t)] \times 0.001 \quad [\text{mol/s}] \quad (25)$$

$$S_{\text{PuO}_2_i} = \frac{6 m_{\text{PuO}_2_i}}{\rho_{\text{PuO}_2} d_{\text{PuO}_2_i}} \quad [\text{cm}^2] \quad (26)$$

R_{PuO_2}	: Ag(II)イオンとPuO ₂ 粉末の反応速度	[mol/s]
M_{PuO_2}	: PuO ₂ 粉末のモル数	[mol]
k_{PuO_2}	: PuO ₂ 粉末の溶解速度定数	[cm/s]
$S_{\text{PuO}_2_i}$: PuO ₂ 粉末のメッシュ <i>i</i> 番目の表面積	[cm ²]
$m_{\text{PuO}_2_i}$: PuO ₂ 粉末のメッシュ <i>i</i> 番目の質量	[g]
ρ_{PuO_2}	: PuO ₂ 粉末の密度	[g/cm ³]
$d_{\text{PuO}_2_i}$: PuO ₂ 粉末のメッシュ <i>i</i> 番目の粒径	[cm]

式(24)でのPuO₂粉末と同様に、UO₂粉末、U₃O₈粉末もAg(II)イオンによって酸化され溶解する。



U₃O₈粉末のAg(II)イオンによる酸化反応は、式(28)、(29)及び(30)があり、U₃O₈粉末1molの溶解に必要なAg(II)イオンのモル数にはいくつか考えられる。本モデルで使用する式の選択は、次章での実験値との比較で決定する。

UO₂ 粉末及び U₃O₈ 粉末との反応速度を次式に示す。PuO₂ 粉末と同様に、UO₂ 粉末及び U₃O₈ 粉末と Ag(II)イオンの反応も、粉末表面積及び Ag(II)イオン濃度で表す。また、溶解速度定数についても PuO₂ 粉末と同様に一定であるものとした。

$$R_{UO_2} = \frac{dM_{UO_2}}{dt} = k_{UO_2} \times \sum S_{UO_2_i} \times [AgII(t)] \times 0.001 \quad [\text{mol / s}] \quad (31)$$

$$R_{U_3O_8} = \frac{dM_{U_3O_8}}{dt} = k_{U_3O_8} \times \sum S_{U_3O_8_i} \times [AgII(t)] \times 0.001 \quad [\text{mol / s}] \quad (32)$$

R_{UO_2}	: Ag(II)イオンと UO ₂ 粉末の反応速度	[mol / s]
M_{UO_2}	: UO ₂ 粉末のモル数	[mol]
k_{UO_2}	: UO ₂ 粉末の溶解速度定数	[cm / s]
$S_{UO_2_i}$: UO ₂ 粉末のメッシュ i 番目の表面積	[cm ²]
$R_{U_3O_8}$: Ag(II)イオンと U ₃ O ₈ 粉末の反応速度	[mol / s]
$M_{U_3O_8}$: U ₃ O ₈ 粉末のモル数	[mol]
$k_{U_3O_8}$: U ₃ O ₈ 粉末の溶解速度定数	[cm / s]
$S_{U_3O_8_i}$: U ₃ O ₈ 粉末のメッシュ i 番目の表面積	[cm ²]

よって、式 (14)、(16)、(21)、(25)、(31) 及び (32) より、陽極における MOX 溶解の Ag(II)イオン濃度の計算式を次式に示す。

$$V_p(t) \times \frac{d[AgII(t)]}{dt} = R_{gen} - 2 \times R_{H_2O} - 2 \times R_{HNO_2} - 2 \times R_{PuO_2} - 2 \times R_{UO_2} - \varepsilon \times R_{U_3O_8} \quad [\text{mol / s}] \quad (33)$$

$$[AgII(t + \Delta t)] = [AgII(t)] + \frac{d[AgII(t)]}{dt} \times \Delta t \quad [\text{mol / L}] \quad (34)$$

ε : U₃O₈ 1mol に反応する Ag(II)イオンの mol 数 [-]

3.実験データとの比較

Ag(II)イオン生成実験、PuO₂粉末、UO₂粉末、およびU₃O₈粉末の溶解実験データを用いて、計算結果との比較を行ない、MOX粉末の“溶解速度定数 k ”を求めるとともに、モデルの妥当性を確認した。

3.1. Ag(II)イオンの生成実験との比較

2.2節の式(25)、(31)、及び(32)に示すように、MOX粉末の溶解速度定数を求めるには、Ag(II)イオン濃度の正確なシミュレーションが必要である。よって、Table3.1に示す、3つの異なる条件でのAg(II)イオン生成実験(G-1、G-2及びG-3)との比較を行ない、Ag(II)イオン濃度を模擬できることを確認した。なお、Ag(II)イオン濃度の分析は、硝酸セリウム(III)水溶液を用い、シュウ酸ナトリウム溶液による電位差滴定法によって行なった。

実験値との比較の結果、Fig.3.1.1に示すように、補正係数を考慮しない場合($\gamma=1$)では、実験値と大きな隔たりを示した。Ag(II)イオンの還元反応速度に対して、本モデルに外挿して用いた式(16)は、補正係数なしではモデルに適用できない。ここで、補正係数 γ の値に2.9を用いることにより、最も実験値に近い値が得られた。補正係数を考慮しなくてはならない要因には、高濃度Ag(II)イオンの存在等が考えられるが、この補正係数の物理化学的意味については、還元反応速度式を含めて、より詳細な検討が必要である。

3.2. PuO₂溶解実験との比較

PuO₂溶解速度定数 k_{PuO_2} を求めるために、Table3.2に示す条件でのPuO₂溶解実験⁶⁾(D-1及びD-2)との比較を行なった。2.2節の式(25)に示すように、Ag(II)イオン濃度が一定であれば、プルトニウム濃度の計算結果は、ほぼ直線的に増加する。溶解速度定数を求めるためには、この直線部分での傾きを利用する必要がある。しかし、Fig.3.2.1およびFig.3.2.2に示すように、実験の溶解初期では、プルトニウム濃度は緩やかに増加している。この要因には、PuO₂粉末を投入してから攪拌を開始しているため、溶液中の粉末が分散状態になるまでに時間を要し、反応表面積が確保できなかったため、溶解初期において、Ag(II)イオンが効率良くPuO₂粉末の溶解に利用されていなかったと考えられる。また、溶解開始から50分後から100分後では、直線的にプルトニウム濃度が増加していることから、溶液中の粉末が分散状態であり、Ag(II)イオンが効率良くPuO₂粉末の溶解に利用されていたと考えられる。そこで、今回のフィッティングでは、実験結果での溶解曲線の直線部分において最小二乗法を適用し、シミュレーション開始時間を設定することにより、溶液中の粉末が分散状態になるまでの時間遅れを補正した。なお、Pu濃度は γ 線測定により求めた。

実験値との比較の結果、Fig.3.2.1 および Fig.3.2.2 に示すように、PuO₂ 溶解速度定数 k_{PuO_2} に $4.2 \mu\text{m}/\text{min}$ を用いることにより、実験値のプルトニウム濃度に対する溶解曲線の傾きおよび平衡濃度をほぼ近似することができた。

3.3. UO₂ 溶解実験との比較

UO₂ 溶解速度定数 k_{UO_2} を求めるために、Table3.2 に示す条件での UO₂ 溶解実験 (D-3 及び D-4) との比較を行なった。実験値との比較の結果、Fig.3.3.1 から Fig.3.3.4 に示すように、UO₂ 溶解速度定数 k_{UO_2} に $5.1 \mu\text{m}/\text{min}$ を用いることにより、実験値のウラン濃度および Ag(II)イオン濃度に対する溶解曲線の傾きおよび平衡濃度をほぼ近似することができた。なお、U 濃度分析は蛍光 X 線分析法によって行なった。

Fig.3.3.1 で示すように、ウラン濃度の実験値は、計算値より最大で 10% 程度低い値であった。この実験値と計算値との間の差に対する要因には、実験装置において、供給した UO₂ 粉末の一部が液抜き管に入り込み、溶け残ったことが考えられる。また、Fig.3.3.2 および Fig.3.3.4 に示すように、Ag(II)イオン平衡濃度の実験値は、計算値より最大で 20% 程度低い値であった。この要因には、実験において電解でのジュール熱等により、陽極液の温度が上昇し、水による Ag(II)イオンの還元反応が促進し、Ag(II)イオン濃度が低下したことが考えられる。

3.4. U₃O₈ 溶解実験との比較

2.2 節で述べたように、硝酸中での Ag(II)イオンによる U₃O₈ 粉末の酸化反応式には、主に式 (28)、(29) 及び (30) の 3 つの反応式が考えられる。本モデルで使用する反応式を選択、および U₃O₈ 溶解速度定数 $k_{\text{U}_3\text{O}_8}$ を求めるために、Table3.2 に示す条件での U₃O₈ 溶解実験 (D-5 及び D-6) との比較を行なった。実験値との比較の結果、Fig.3.4.1 から Fig.3.4.4 に示すように、1 mol の U₃O₈ に対して 4 mol の Ag(II)イオンが反応する式 (29) を用い、U₃O₈ 溶解速度定数 $k_{\text{U}_3\text{O}_8}$ に $107.2 \mu\text{m}/\text{min}$ を用いることにより、実験値を最も良く近似することができた。なお、U 濃度分析は蛍光 X 線分析法によって行なった。

PuO₂ や UO₂ に比べて U₃O₈ に対する溶解速度定数が非常に大きい。これに関しては、選択する Ag(II)イオンによる酸化反応式を始めとして、検討する余地が多い。この検討事項の 1 つに硝酸による溶解の影響がある。U₃O₈ 粉末は室温の硝酸によっても溶解することが知られている。U₃O₈ 溶解速度定数 $k_{\text{U}_3\text{O}_8}$ には、この硝酸による溶解分も含まれていることが考えられる。このため、Ag(II)イオンによる溶解に対して、硝酸のみによる溶解の影響の程度を調べるために、U₃O₈ 粉末を球形であると仮定し、溶解速度の比較を行なった。硝酸による U₃O₈ 粉末の溶解率の計算式を次式に示す¹⁰⁾。

$$1 - (1 - X)^{\frac{1}{3}} = k_{\text{HNO}_3} t \quad (35)$$

X : U_3O_8 粉末の溶解率 [-]

k_{HNO_3} : HNO_3 による U_3O_8 粉末の溶解速度定数 [min^{-1}]

この比較結果、Fig.3.4.5 に示すように、溶解曲線の傾きから平均速度を算出すると、硝酸の溶解速度は、 $Ag(II)$ イオンによる溶解速度の5分の1程度であり、寄与は大きくないものの、無視できるほど小さくはない。しかし、この寄与の割合については、溶液温度や硝酸濃度等の条件に大きく影響することが考えられ、今後の検討課題である。

以上の実験データと計算結果との比較により、本シミュレーションコードにおいて、補正係数及び溶解速度定数に、適切な値を用いることにより、 PuO_2 、 UO_2 等の粉末の溶解曲線をほぼ近似することができた。よって、硝酸濃度や $Ag(II)$ イオン濃度等の溶解条件が本章の比較で用いた実験と同程度である NUCEF での MOX 溶解運転に対しては、本モデルが妥当であると考えられる。

4.溶解速度に及ぼす MOX 粉末溶解パラメータ解析

溶解速度に及ぼす溶解パラメータの影響を、本シミュレーションコードにより解析した。計算の基本条件には、前章の実験データとの比較で使用した PuO_2 粉末の溶解実験での条件を用いた。本報告では、既存の装置において、溶解条件の中で変更可能であり、溶解速度に影響を与えることが予想されるパラメータである“初期 Ag(I) イオン濃度”、“陽極液温度”、“陽極硝酸濃度”、“ PuO_2 粉末粒径”の4つのパラメータに注目し、溶解速度に及ぼす影響の解析を行なった。なお、粉末の溶解反応の律速段階であると考えられる Ag(II) イオンの生成供給のパラメータである電流値は一定とし、本章での解析には含めなかった。

パラメータの振幅は、実験条件での値の $1/10$ から 10 倍とした。ただし、陽極液温度および陽極硝酸濃度のパラメータは、実験条件での値を $1/10$ から 10 倍とすると、実際の実験条件から逸脱してしまう。このため、実験において想定される範囲を考慮し、パラメータの振幅を $1/2$ から 2 倍および $1/4$ から 3 倍とした。この結果を Fig.4.1 から Fig.4.4 に示す。

Fig.4.1 より、初期 Ag(I) イオン濃度が高いほど溶解速度は速くなる傾向にある。これは、初期 Ag(I) イオン濃度が高いほど、溶解中の溶液中に存在する Ag(II) イオンの濃度が大きくなることに依存する。初期 Ag(I) イオン濃度が 0.05mol/L 以上では変化が小さくなった。溶解に必要な Ag(II) イオン濃度は、電流値が一定であれば、ほぼ溶液温度によって決定され、 Ag(I) イオンが過剰に存在する濃度以上であれば、 Ag(I) イオン濃度が溶解速度に与える影響は少ない。

Fig.4.2 より、陽極液温度は低いほど溶解速度は速くなる傾向にある。これは、陽極液温度が低いほど、2.2 節の式 (15) に示した Ag(II) イオンの水による還元反応が生じ難くなり、溶解に必要な Ag(II) イオンの平衡濃度が高くなるためである。陽極液温度が 25°C 以下では変化が小さくなった。今回の電流値では、 Ag(II) イオンの電解による生成に対し、陽極液温度 25°C 以下の水による還元反応は無視できる程度に小さいといえる。本モデルにおいて、銀媒体電解酸化法による PuO_2 粉末の溶解は、2.2 節の式 (24) に示す酸化反応のみで溶解すると仮定しているため、この溶解速度定数は酸化反応速度定数といえる。しかしながら、現状では、この陽極液温度が溶解速度定数に及ぼす影響を考慮していない。この反応の温度依存性の把握については今後の課題である。

Fig.4.3 より、陽極硝酸濃度が高いほど溶解速度が速くなる傾向にある。これも、陽極硝酸濃度が高いほど Ag(II) イオンの水とによる還元反応が生じ難くなるためである。陽極硝酸濃度が 4mol/L 以上では変化が小さくなった。陽極液温度パラメータの影響と同様に、今回の電流値では、 Ag(II) イオンの電解による生成に対し、硝酸濃度 4mol/L 以上の水による還元反応は無視できる程度に小さいといえる。ここで、溶解速度定数つまり酸化反応速度定数に対する硝酸濃度の影響は考慮していない。硝酸濃度の依存性の把握についても今後

の課題である。

Fig.4.4 より、PuO₂ 粉末粒径が小さいほど溶解速度は速くなる傾向にある。PuO₂ 粉末のメジアン粒径が 0.2 μm 以下では変化が小さくなった。これは、粉末粒径が 0.2 μm 以下は十分に小さく、溶解速度に対する影響が少ないことが考えられる。

Fig.4.1 から Fig.4.4 より 4 つのパラメータの影響を比較すると、電流値一定で、実際の実験条件を考慮した範囲では、初期 Ag(I)イオン濃度や陽極液温度、陽極硝酸濃度に比べて、溶解速度に対する粉末粒径の寄与が大きいことが確認できた。これにより、溶解速度を把握するためには、MOX 粉末の粒度等の性状を把握しておくことが重要であると考えられる。

5.おわりに

本報告書では、銀媒体電解酸化法による MOX 粉末の溶解挙動をシミュレートするための計算コードの概要を示し、実験データとの比較及び溶解速度に及ぼす溶解運転パラメータの解析を行なった。

本シミュレーションコードにおいて、MOX 粉末に対する適切な溶解速度定数の値を用いることにより、溶解挙動を良くシミュレートできることを確認した。また、溶解速度に及ぼす溶解運転パラメータの影響には、特に粉末粒径の寄与が大きいことを確認した。

今後、NUCEF で行なう工学規模の MOX 粉末溶解試験において、MOX 粉末の溶解データを取得し、本シミュレーションコードの検証を行なう予定である。

謝辞

計算コードの作成に携って頂いた(株)三菱マテリアルの矢野肇氏、鈴木秀和氏、並びに実験データを提供して頂いた環境科学部環境技術開発グループ桜井聡氏に深く感謝します。また、本報告書の作成にあたり貴重なコメントを賜りました安全試験部長鈴木康文氏、並びに燃料サイクル安全工学部プロセス安全研究室峯尾英章氏に深く感謝します。

参考文献

- 1) I.Takeshita, A. Ohno, N.Izawa, Y.Miyoshi, A.Maeda, S.Sugikawa and M.Miyauchi :
“Current status of criticality safety experiment in NUCEF and its enhancement of facility function toward Pu experiment” , Proc. of ICNC'99, 1512-1516 (1999).
- 2) H.D.Greiling and K.H.Lieser : “Properties of ThO₂, UO₂ and PuO₂ as Function of Pretreatment and their Dissolution in HNO₃” , Radiochimica Acta, Vol.35, 79-89 (1984).
- 3) S.Sugikawa, H.Hakuhou, I.Takeshita, H.Yano, K.Kimura, S.Tanaka, P.Bretault, R.Vialard and M.Lecomte : “Mock-up tests for design of silver mediated electrolytic dissolver” , Proc. of RECOD'98, volume III, 930-938 (1998).
- 4) F.J.Poncelet, M.H.Mouliney, V.Decobert and M.Lecomte : “Industrial Use of Electrogenerated Ag(II) for PuO₂ Dissolution” , Proc. of RECOD'94, volume I, (1994).
- 5) Y.Zundeleovich : “The mediated electrochemical dissolution of plutonium oxide : kinetics and mechanism” , Journal of Alloys and Compounds, 182, 115-130 (1992).
- 6) 桜井聡、白田重和、阿見則男、平田勝、若松幸雄、館盛勝一 : “電解酸化法による二酸化プルトニウムの溶解、(II)スケールアップ実験と精製法” , 日本原子力学会誌, Vol.35 No.2, 147-154 (1993).
- 7) T.Fukasawa, Y.Ozawa and F.Kawamura : “Generation and Decomposition of Nitrous Acid in UO₂ Pellet Dissolution by Nitric Acid” , Nuclear Technology, Vol.94 No.1, 108-113 (1991).
- 8) H.N.Po, J.H.Swinehard and T.L.Allen : “The Kinetics and Mechanism of the Oxidation of Water by Silver(II) in Concentrated Nitric Acid Solution” , Inorganic Chemistry, Vol.7 No.2, 244-249 (1968).
- 9) A.Inoue and T.Tsujino : “Dissolution Rates of U₃O₈ Powders in Nitric Acid” , I&EC Process Design and Development, Vol.23 No.1, 122-125 (1984).

Table 3.1 Initial conditions for experiments of Ag(II) generation

parameters	experiment		
	G-1	G-2	G-3
current [A]	10	1	10
anode			
silver concentration [mol/L]	0.05	0.1	0.05
nitric acid concentration [mol/L]	4	4	4
volume [L]	0.5	0.3	4
cathode			
nitric acid concentration [mol/L]	13	4	13
volume [L]	0.16	0.1	0.15
temperature [°C]	25	26	20

Table 3.2 Initial conditions for dissolution experiments

parameters	experiments					
	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6
current [A]	2.5	10	100	100	100	100
anode						
silver concentration [mol/L]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
nitric acid concentration [mol/L]	4	4	4	4	4	4
volume [L]	1	1	8.5	8.5	8.5	8.5
cathode						
nitric acid concentration [mol/L]	8	8	11	13	11	11
volume [L]	0.08	0.08	0.9	0.9	0.9	0.9
additional nitric acid flow [L/h]	0	0	0.16	0.16	0.16	0.16
additional nitric acid concentration [mol/L]	0	0	11	13	11	11
temperature [°C]	25	26	25	25	25	25
powder	PuO ₂	PuO ₂	UO ₂	UO ₂	U ₃ O ₈	U ₃ O ₈
median particle size [μ m]	0.2	0.2	0.03	0.03	0.24	0.24
initial feed [g]	21.2	80.1	0	0	0	0
feed time [min]	0	0	15~55	30~313	15~29	30~330
feed rate [g/min]	0	0	12.5	8.834	35.7	8.333
feed amount [g]	21.2	80.1	500	2500	500	2500

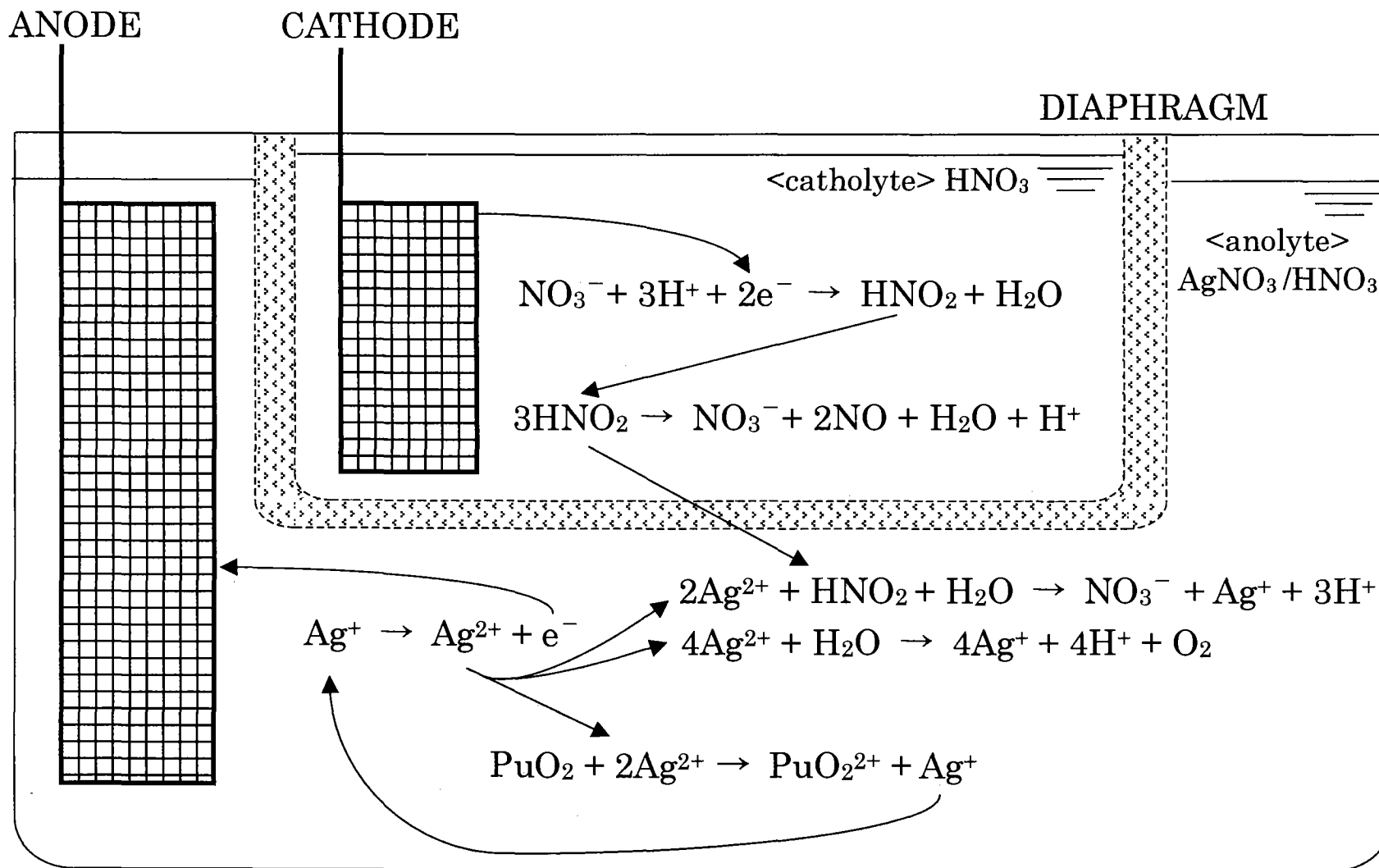


Fig.2.1 Schematic of a electrochemical reaction mechanism for the PuO₂ dissolution process using Ag²⁺.

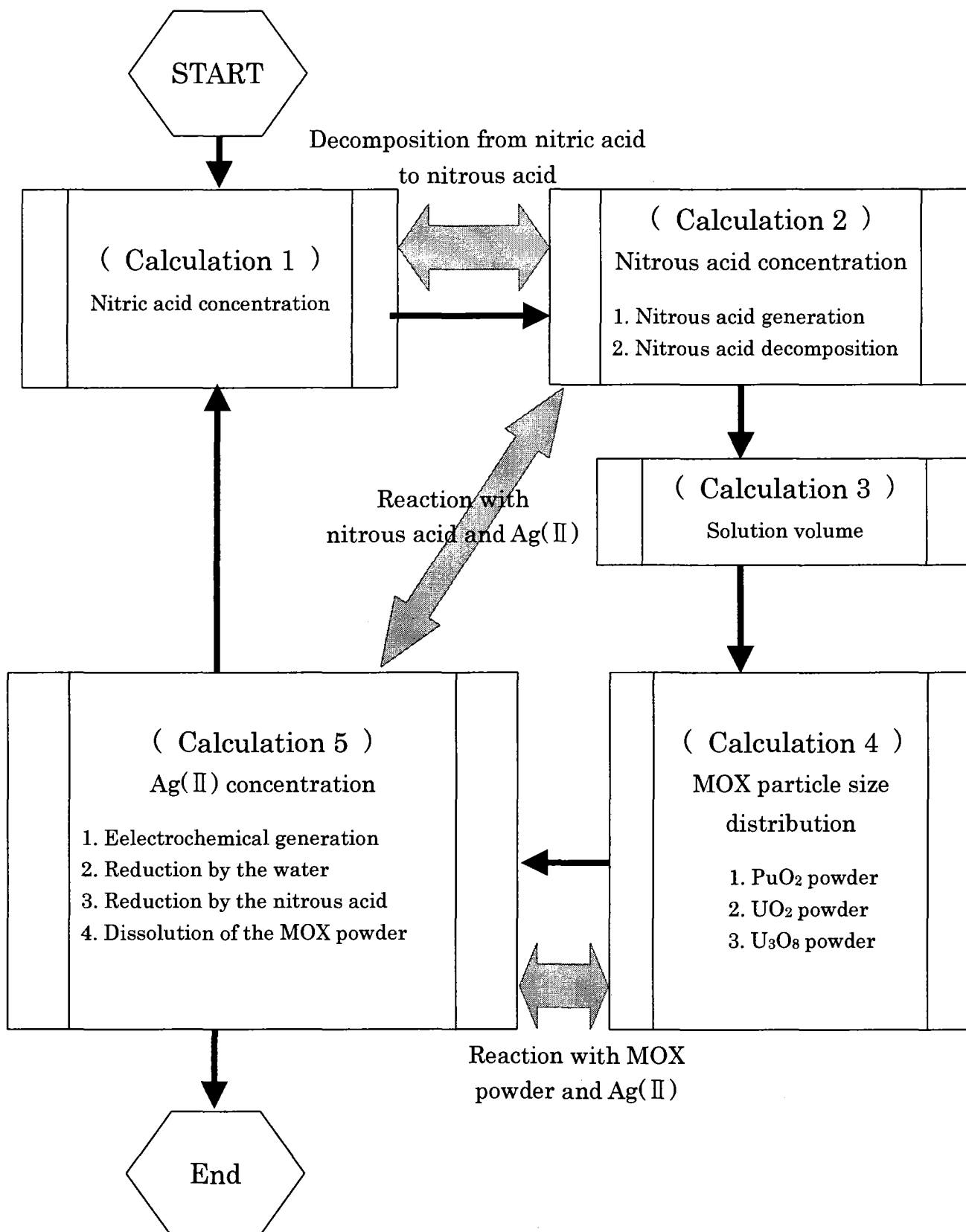


Fig.2.2 Flow diagram of calculation by proposed code.

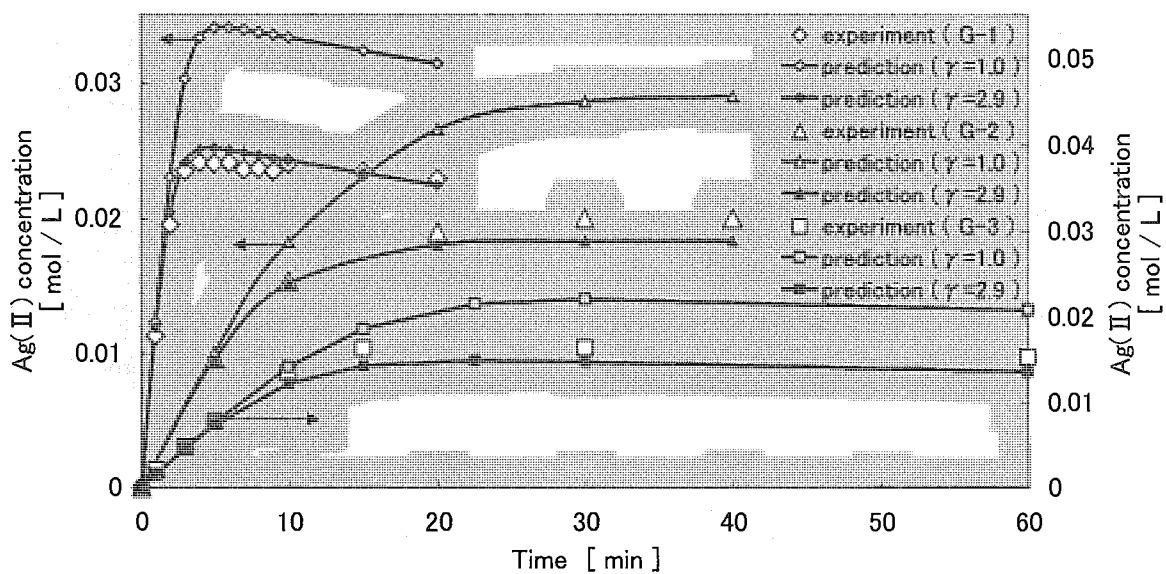


Fig.3.1.1 Effect of γ value on Ag(II) concentration change obtained at experimental conditions listed in table 3.1

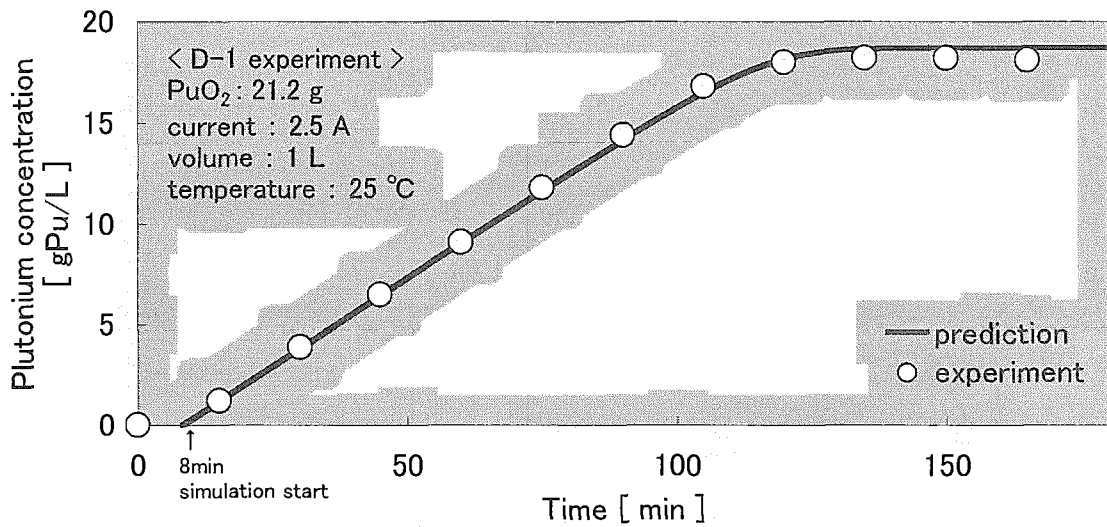


Fig.3.2.1 Comparison of experiment data with predicted plutonium concentration change obtained at experimental conditions listed in table 3.2 ($k_{PuO_2} = 4.2 \mu m/min$).

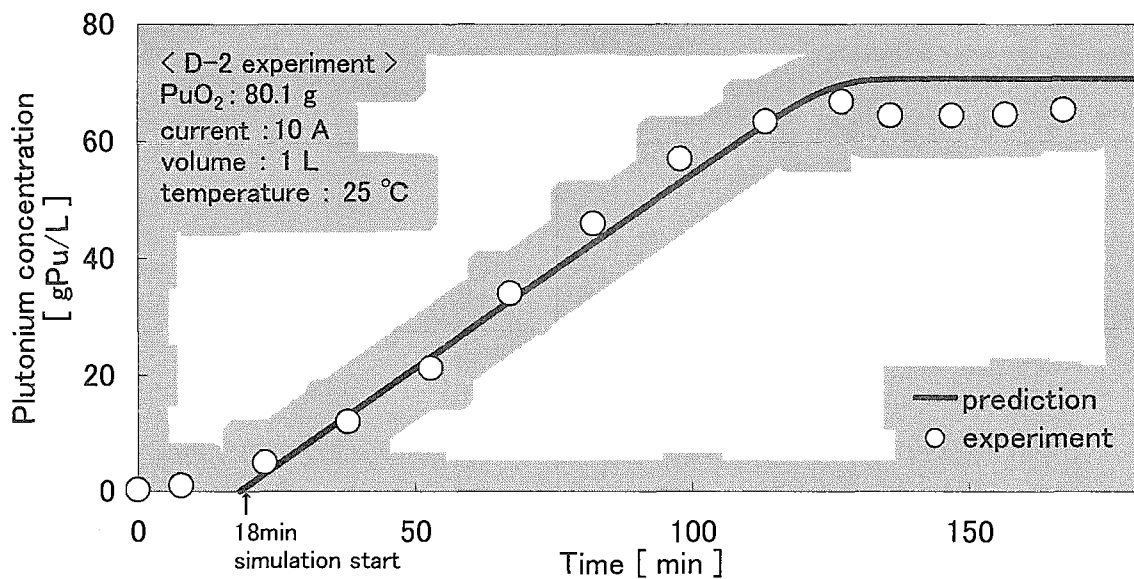


Fig.3.2.2 Comparison of experiment data with predicted plutonium concentration change obtained at experimental conditions listed in table 3.2 ($k_{PuO_2} = 4.2 \mu m/min$).

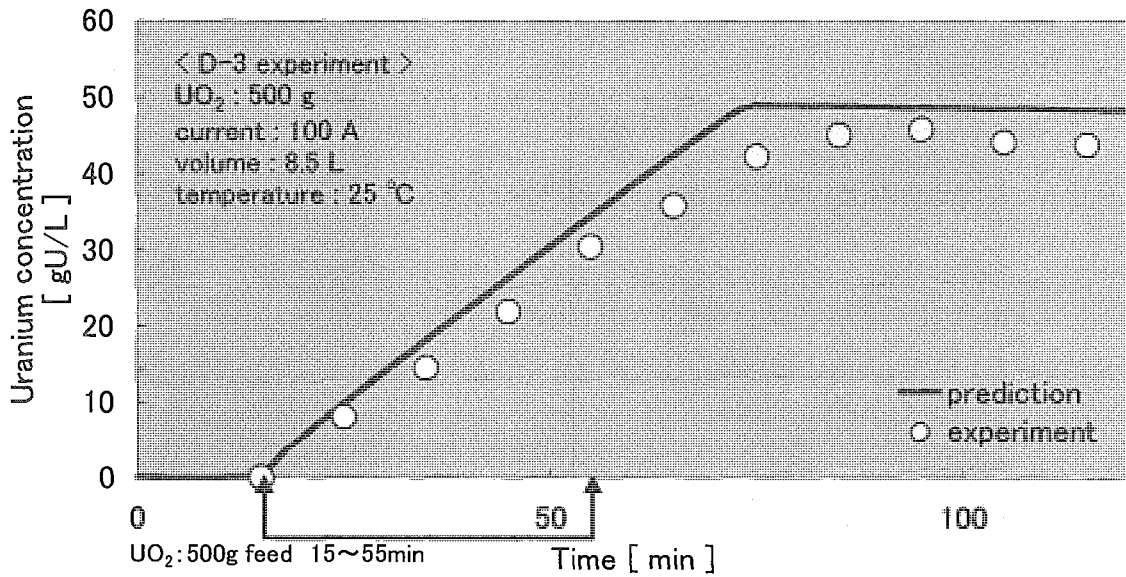


Fig.3.3.1 Comparison of experiment data with predicted uranium concentration change obtained at experimental conditions listed in table 3.2 ($k_{UO_2} = 5.1 \mu m/min$)

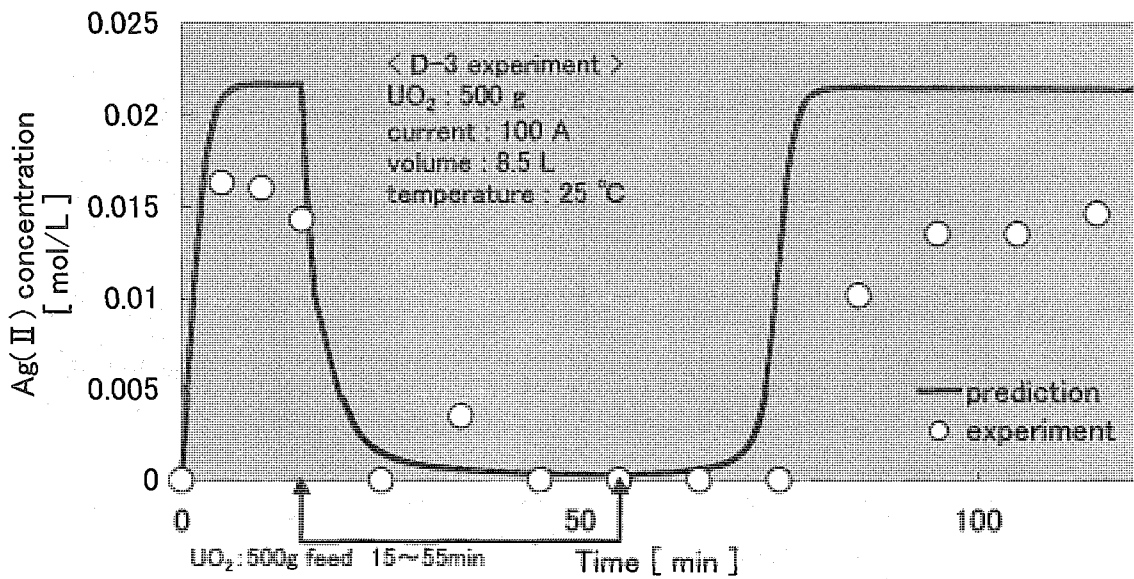


Fig.3.3.2 Comparison of experiment data with predicted Ag(II) concentration change obtained at experimental conditions listed in table 3.2 ($k_{UO_2} = 5.1 \mu m/min$)

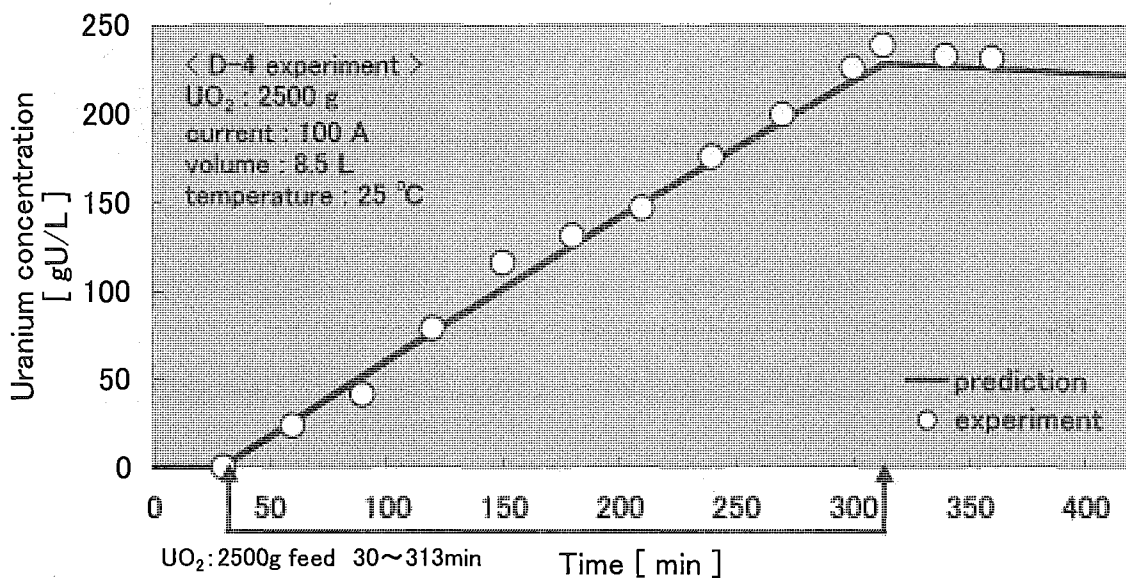


Fig.3.3.3 Comparison of experiment data with predicted uranium concentration change obtained at experimental conditions listed in table 3.2 ($k_{UO_2} = 5.1 \mu m/min$)

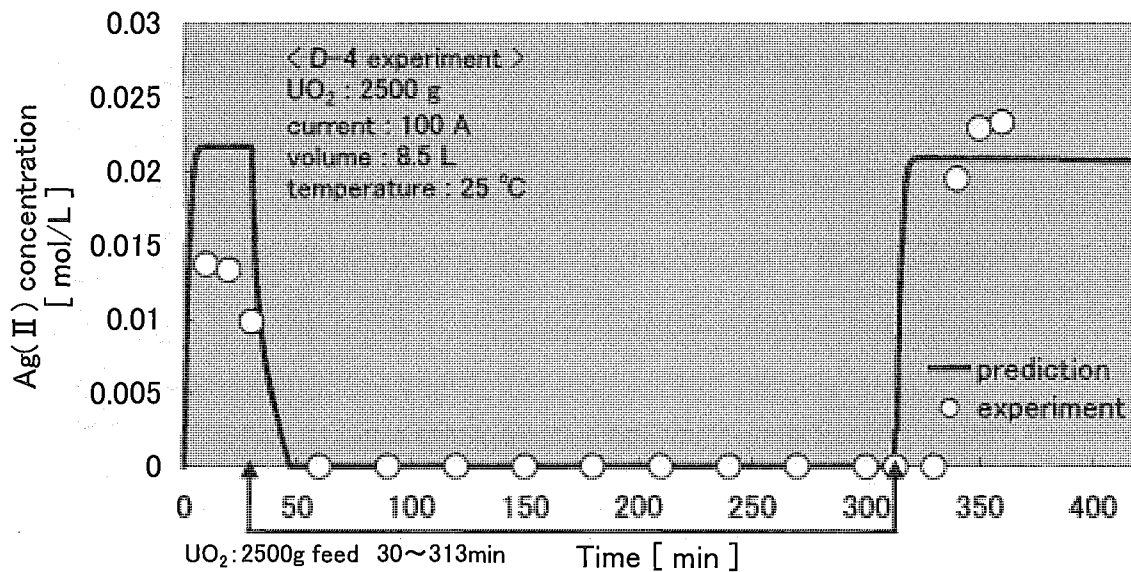


Fig.3.3.4 Comparison of experiment data with predicted Ag(II) concentration change obtained at experimental conditions listed in table 3.2 ($k_{UO_2} = 5.1 \mu m/min$)

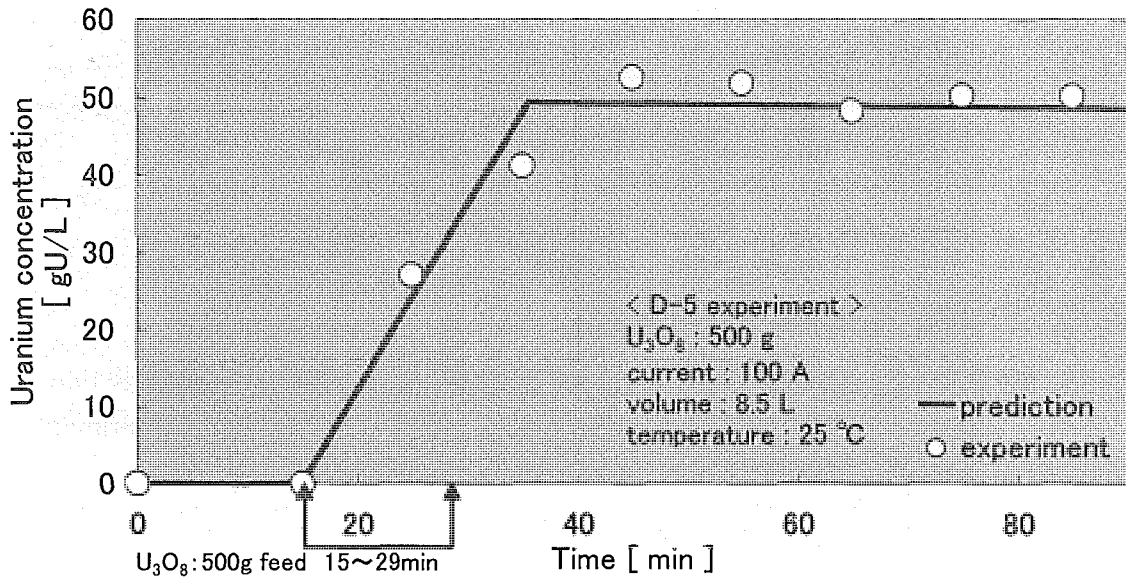


Fig.3.4.1 Comparison of experiment data with predicted uranium concentration change obtained at experimental conditions listed in table 3.2($k_{U_{308}} = 107.2 \mu m/min$)

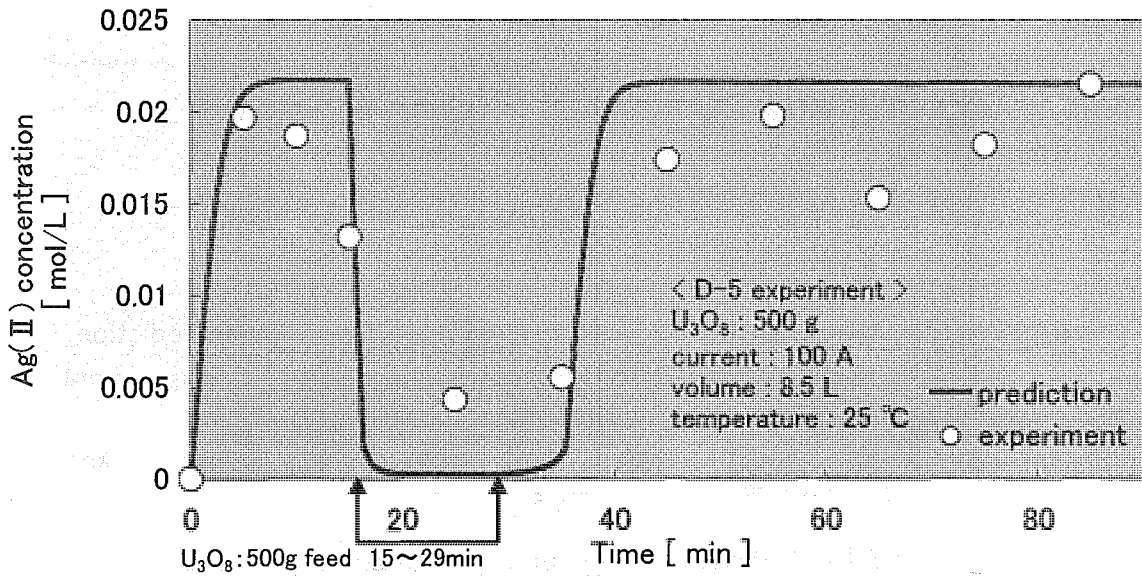


Fig.3.4.2 Comparison of experiment data with predicted Ag(II) concentration change obtained at experimental conditions listed in table 3.2 ($k_{U_{308}} = 107.2 \mu m/min$)

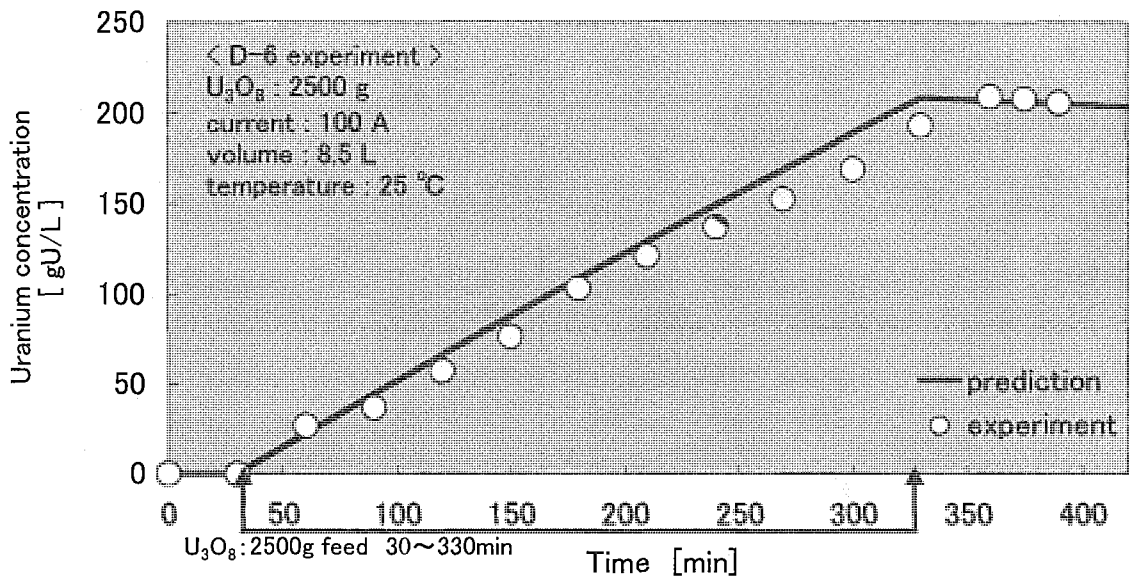


Fig.3.4.3 Comparison of experiment data with predicted uranium concentration change obtained at experimental conditions listed in table 3.2 ($k_{U_{3O_8}} = 107.2 \mu m/min$)

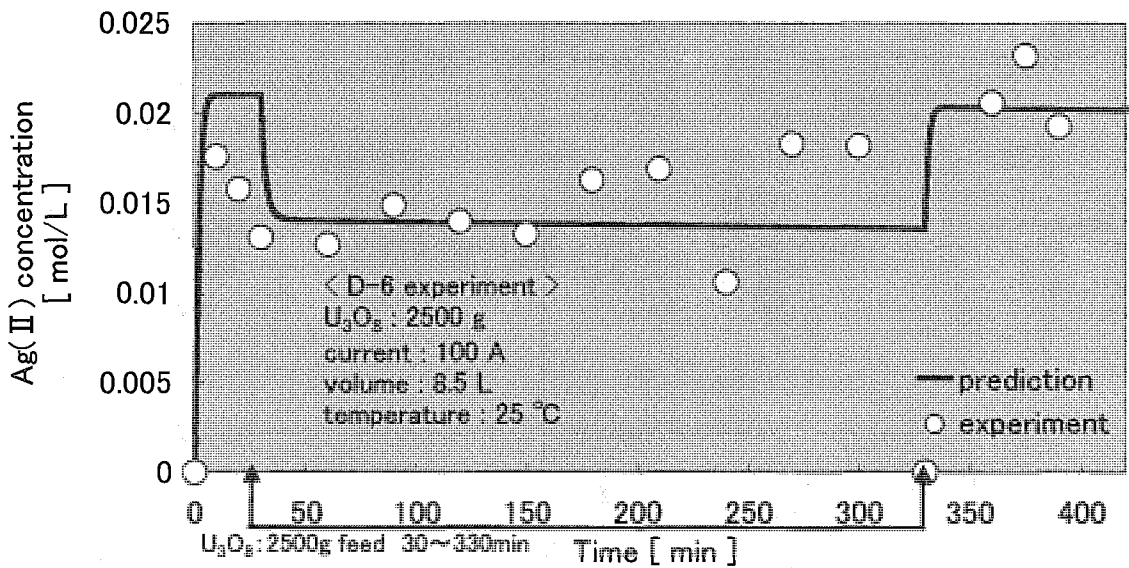


Fig.3.4.4 Comparison of experiment data with predicted Ag(II) concentration change obtained at experimental conditions listed in table 3.2 ($k_{U_{3O_8}} = 107.2 \mu m/min$)

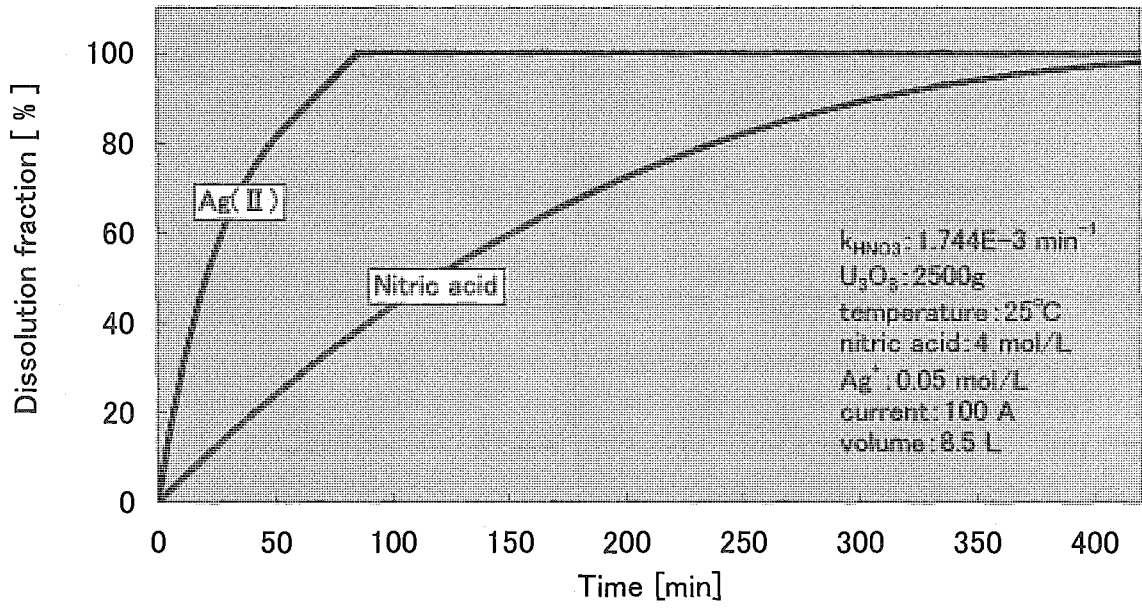


Fig.3.4.5 Dissolution of U_3O_8 powder in nitric acid

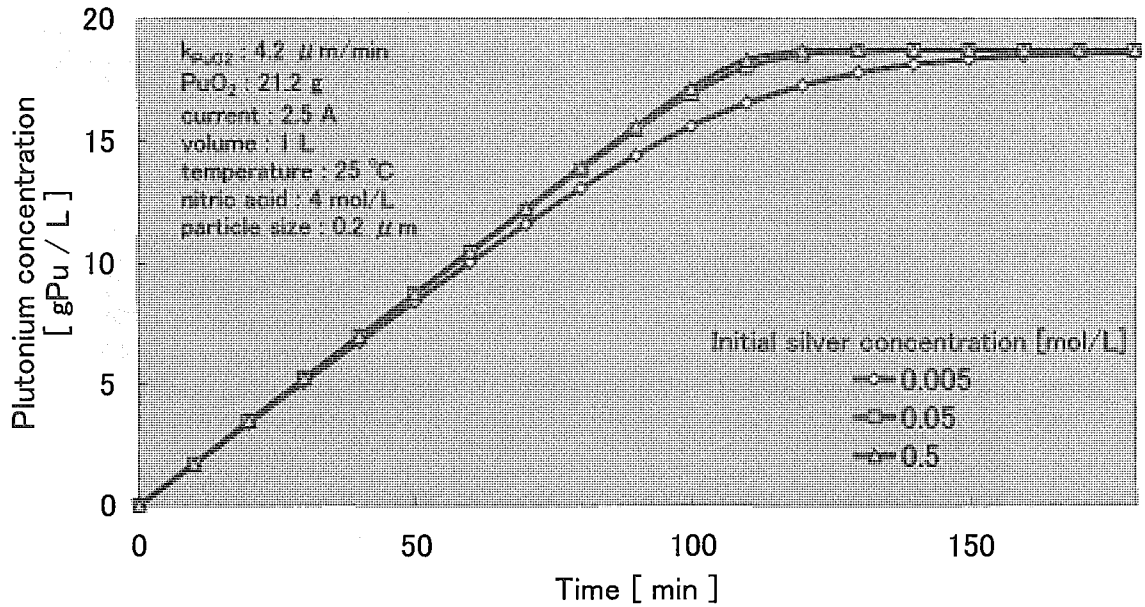


Fig.4.1 Effect of initial silver concentration on the dissolution rate

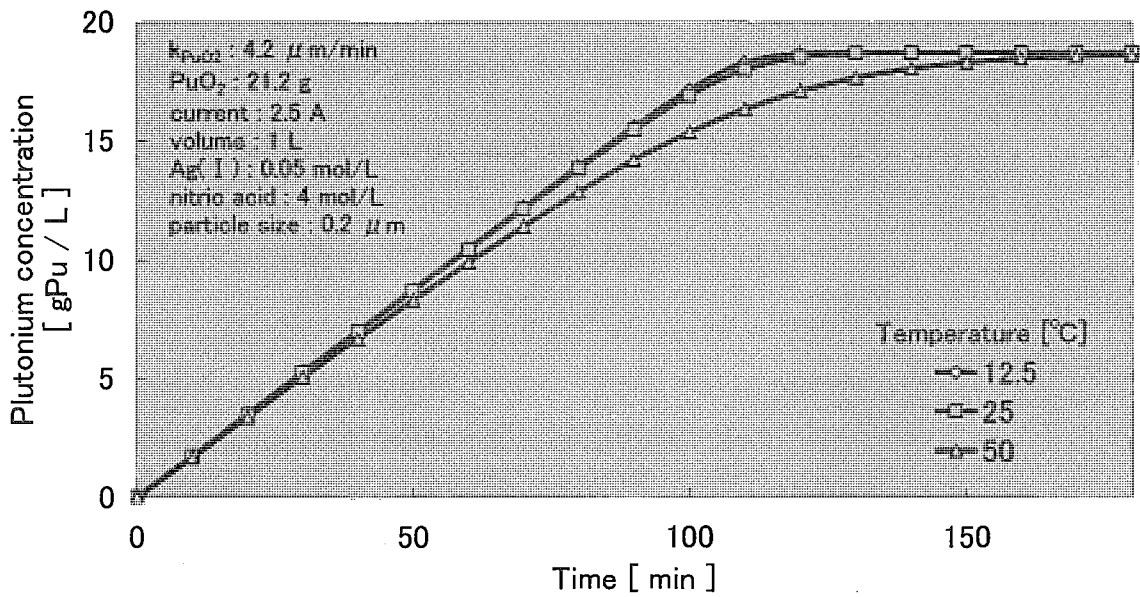


Fig.4.2 Effect of anode temperature on the dissolution rate

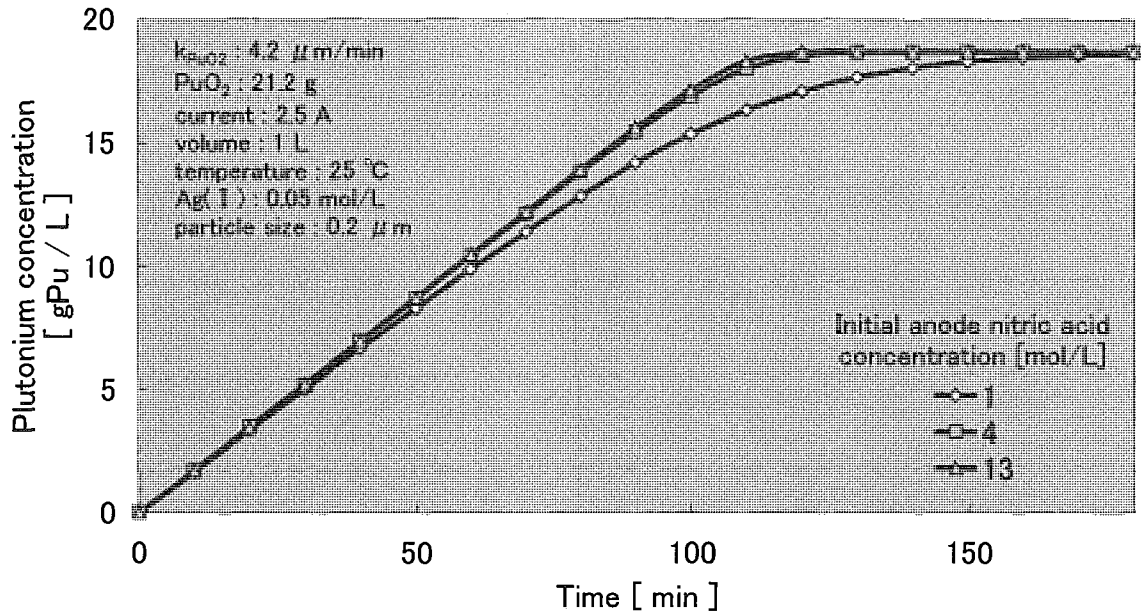


Fig.4.3 Effect of initial anode nitric acid concentration on the dissolution rate

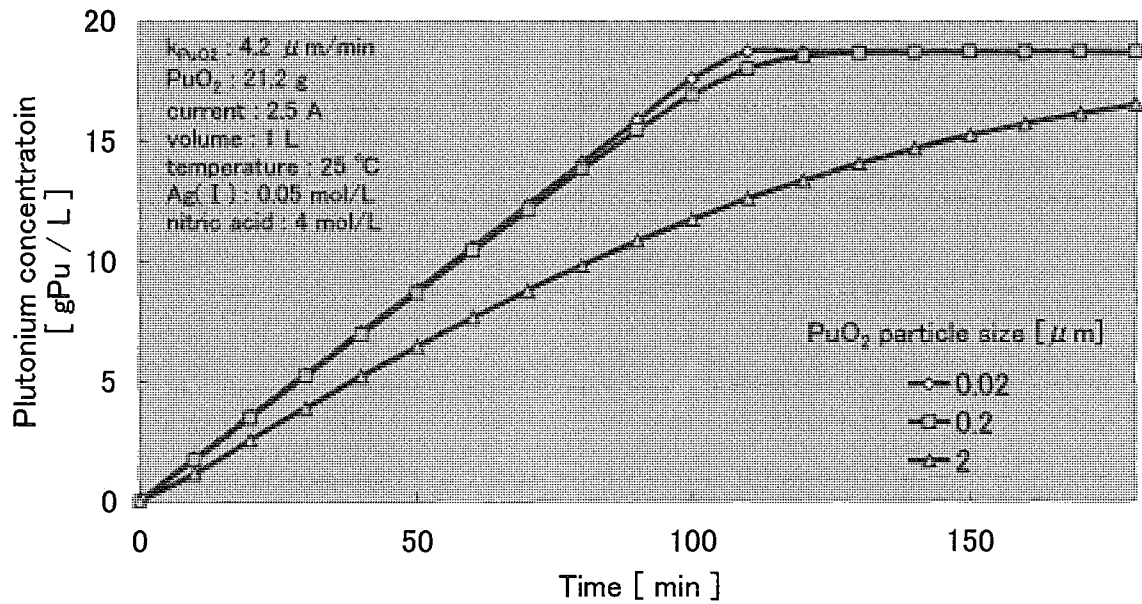


Fig.4.4 Effect of initial PuO_2 particle size on the dissolution rate

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	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
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J

1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10⁻¹⁰m

1 b=100fm²=10⁻²⁸m²

1 bar=0.1MPa=10⁵Pa

1 Gal=1cm/s²=10⁻³m/s²

1 Ci=3.7×10¹⁰Bq

1 R=2.58×10⁻⁴C/kg

1 rad=1cGy=10⁻²Gy

1 rem=1cSv=10⁻²Sv

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局1985年刊行による。ただし, 1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値による。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- E C 関係理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れていない。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²)=10 P (ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10 ⁻⁴	1.35951×10 ⁻³	1.31579×10 ⁻³	1	1.93368×10 ⁻²
	6.89476×10 ⁻³	7.03070×10 ⁻²	6.80460×10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10 ⁻⁷	0.238889	9.47813×10 ⁻⁴	0.737562	6.24150×10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407×10 ⁻⁶	2.34270	9.29487×10 ⁻³	7.23301	6.12082×10 ¹⁹
	3.6×10 ⁶	3.67098×10 ⁵	1	8.59999×10 ⁵	3412.13	2.65522×10 ⁶	2.24694×10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279×10 ⁻⁶	1	3.96759×10 ⁻³	3.08747	2.61272×10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072×10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515×10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616×10 ⁻⁷	0.323890	1.28506×10 ⁻³	1	8.46233×10 ¹⁸
	1.60218×10 ⁻¹⁹	1.63377×10 ⁻²⁰	4.45050×10 ⁻²⁶	3.82743×10 ⁻²⁰	1.51857×10 ⁻²²	1.18171×10 ⁻¹⁹	1

1 cal= 4.18605J (計量法)
 = 4.184J (熱化学)
 = 4.1855J (15°C)
 = 4.1868J (国際蒸気表)
 仕事率 1 PS(仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10 ⁻¹¹
	3.7×10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

銀媒体電解酸化法によるMOX溶解シミュレーションコードの開発（受託研究）

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています