

原子力防災システムに用いる核データの評価 - 最新核データと既存の核データによる炉心蓄積放射エネルギーの比較 -

Evaluation of Nuclear Data for Emergency Preparedness System of Nuclear Power Plants
- Comparison of Radioactivity Inventories by Newest Nuclear Data and Rather Older Nuclear Data -

吉田 至孝 (Yoshitaka Yoshida)* 木村 逸郎 (Itsuro Kimura)*

要約 原子力防災システムに必要な炉心蓄積放射エネルギーについて、現在わが国で一般的に使用されている核データと計算コード（汎用版）、原子力安全システム研究所で筆者らが使用しているもの（INSS版）および最新の核データライブラリと最新の計算コード（最新版）により計算したものを比較し、最新版に対する汎用版およびINSS版の保守性の有無を確認するとともに、核データ、崩壊データおよび計算コードの違いによる炉心蓄積放射エネルギーへの影響を検討した。その結果、(1) 汎用版およびINSS版による炉心蓄積放射エネルギーは、最新版に対して保守性が認められなかったが、その差は10%以内であり、原子力防災システムに大きな影響を与えるものではないと考えられる。(2) 核データの違いにより運転中の中性子束に差が発生し、これにより¹³⁵Xeのビルドアップなどの炉心蓄積放射エネルギーへの影響が認められた。(3) 崩壊データの違いによる影響はほとんど認められなかった。(4) 計算コードORIGEN2.1はマイナーアクチノイドによる核分裂生成核種を過小評価していた。以上の結果より、原子力防災システムで用いる炉心蓄積放射エネルギーは、JENDL3.3に基づくORIGEN2用ライブラリと計算コードORIGEN2.2の組み合わせによる評価結果を用いることが推奨される。

キーワード 原子力防災, 核データ, ORIGEN2, 蓄積放射エネルギー, JENDL3.3, 核崩壊データ

Abstract The radioactivity inventories for emergency preparedness systems of nuclear power plants calculated by the combination of the generally-used in Japan (general-version), the INSS used by the present authors (INSS-version) and the newest nuclear data library and codes (newest-version) were compared, and the maintaining of conservativeness of the general-version and the INSS-version against the newest-version was examined. And the influences on the radioactivity inventories by the difference between the nuclear cross section and fission yield data, decay data and calculation codes were investigated. As a result, (1) the radioactivity inventories calculated by general-version and INSS-version were not confirmed the conservativeness to the newest-version. But the difference was less than 10%, and it would not give large influence to the calculation of the emergency preparedness system of nuclear power plants. (2) The influence of the radioactivity inventories such as ¹³⁵Xe build-up were observed by the difference of neutron flux level in an operation of reactors that occurred by the variety of nuclear cross section and fission yield data. (3) Little influence by the variety of decay data was confirmed. (4) The ORIGEN2.1 code underestimated the amount of fission products generated by fission of minor actinides. From these result, the radioactivity inventories for the emergency preparedness system of nuclear power plants are recommended to use the calculation results by the combination of the library for ORIGEN2 based on JENDL3.3 and the ORIGEN2.2 code.

Keywords Nuclear Disaster Prevention, Nuclear Data, ORIGEN2, Radioactivity Inventory, JENDL3.3, Nuclear Decay Data

1. 緒言

原子力防災は、万が一原子力施設で事故が起こった場合、公衆を放射線および放射性物質から防護することを主たる目的としている。原子力施設を対象

とした原子力防災システム⁽¹⁾⁻⁽³⁾は、原子炉の運転に伴い蓄積された核分裂生成物が、苛酷な事故が発生することにより原子炉格納施容器内に放出され、原子炉格納容器の内封機能喪失を仮定して環境中に放出される放射性物質の量（放射エネルギー）を推定し、原

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

子炉施設周辺の地形や気象状況に基づき放射性物質が大気中を拡散した場合における一般公衆や従業員の被ばく線量を予測する機能が含まれている。このうち、核分裂生成物は、原子炉の運転に伴う核分裂によって生成し中性子照射や自発的壊変により娘核種へ変化していくため、その放射エネルギーは原子炉の運転時間と事故に伴う原子炉停止後の経過時間により変化する。一般的に原子力防災において評価対象となる核分裂生成物は希ガスとヨウ素であるが、希ガスの放射エネルギーは24時間で約5分の1（0.5 MeV 等価換算値では約40分の1）程度まで低下することが知られている。

原子炉内の核分裂生成物の生成および壊変による放射エネルギーは、核データライブラリと呼ばれる原子核の特性（核分裂断面積、核分裂収率、崩壊定数など）を用いて約1000核種の挙動をコンピュータで解析することにより求めている。核データは、主なものとして米国のENDF/B、欧州のJEF、日本のJENDLが知られている。コンピュータ解析コードはORIGENが主流である。これは1970年にオークリッジ国立研究所で開発された原子燃料の燃焼計算コードで、当初は中性子スペクトルインデックスを入力する必要があるが、1980年にORIGEN2⁽⁴⁾が開発され、中性子スペクトルインデックスの代わりに計算対象の条件に合った核データライブラリを用いる方式に変更された。核データライブラリは、炉型、燃料形式（ウラン燃料または混合酸化物燃料）、濃縮度または組成比、最高燃焼度別に炉心の燃焼または集合体の燃焼を想定して個別に作成される。その後1990年にORIGEN2.1⁽⁵⁾が作成され、現在はこのコードが一般的に利用されている。しかし、ORIGEN2.1にはマイナーアクチノイドの核分裂によって生成する核種の計算ロジックに誤りが見つかり、2003年には最新版のORIGEN2.2⁽⁶⁾が公開されている。ORIGEN2には当初米国の核データライブラリが内蔵されていたが、わが国では日本原子力研究所からJENDLを使用したORIGEN2用ライブラリが公開された。2002年、最近の実験や理論的なモデルを用いて精度向上が図られたJENDL3.3⁽⁷⁾が発表され、これに基づくORIGEN2用ライブラリも作成されている。

本研究では、従来から使用している炉心に蓄積された核分裂生成物の放射エネルギー（炉心蓄積放射エネルギー）が、最新の知見を踏まえた結果に対して保守性があるかどうかを確認するため、ORIGEN2コードを用いて、(1)一般的に使用されているORIGEN内蔵ライブラリ、

(2)原子力安全システム研究所の原子力防災システムに使用しているJENDL3.2⁽⁸⁾に基づくORIGEN2用ライブラリ⁽⁹⁾⁻⁽¹⁰⁾および(3)最新のJENDL3.3に基づくORIGEN2用ライブラリ⁽¹¹⁾による計算結果を比較するとともに、それぞれの核データライブラリや計算コードの違いが炉心蓄積放射エネルギーへ与える影響を把握することを目的とした。

2. 評価対象炉心の概要

評価対象炉心は、UO₂炉心とMOX炉心である。UO₂炉心は17×17型ウラン燃料193体で構成され、MOX炉心は17×17型混合酸化物燃料40体（1/4MOX）と17×17型ウラン燃料117体で構成される。最高燃焼度はUO₂炉心が55 GWd/t、MOX炉心が48GWd/t、比出力はUO₂炉心が37.6MW/t、MOX炉心が36.7 MW/tとした。表1に評価対象炉心の概要を示す。

設定した評価対象炉心の計算条件に合うORIGEN2用ライブラリとして、(1)ORIGEN内蔵からPWR-U50およびPWR-PUPUを、(2)JENDL3.2からPWR47J32、PWR41J32およびPWRM0205J32を、(3)JENDL3.3からPWR47J33、PWR41J33、PWRM0205J33の3つを選択した。選択したORIGEN2用ライブラリとその特徴を表2に示す。

なお、参考までに出力規模を同一にしたUO₂炉心とMOX炉心の炉心蓄積放射エネルギーは、原子炉停止直後は短半減期核種の生成量の違いが見られるが、原子炉停止24時間経過後の希ガス0.5MeV換算値とヨウ素131等価換算値では両者にほとんど差はない。

表1 評価対象炉心の概要

評価対象	ウラン炉心	MOX 炉心
炉心構成	UO ₂ (17×17 燃料)	1/4MOX (17×17 燃料)
集合体数	193体	157体 (UO ₂ :117 体) (MOX:40 体)
最高燃焼度	55GWd/t	48GWd/t
燃焼サイクル	3バッチ	3バッチ
平均燃焼度	36.7GWd/t	30.6GWd/t
比出力	37.6 MW/t	36.7 MW/t

表2 選択した ORIGEN2 用ライブラリとその対象炉心

		核データ ライブラリ	ORIGEN2 用 ライブラリ	対 象 炉 心
UO ₂ 炉心		JENDL3.3	PWR47J33	濃縮度 4.7%, 最高燃焼度 60GWd/t, 集合体平均
		JENDL3.2	PWR47J32	濃縮度 4.7%, 最高燃焼度 60GWd/t, 集合体平均
		ORIGEN 内蔵	PWR-U50	濃縮度 4.15%, 最高燃焼度 50GWd/t, 燃料取替 5 バッチ炉心平均
MOX 炉心	MOX 燃料	JENDL3.3	PWRM0205J33	Pu 富化度 5%, 最高燃焼度 60GWd/t, 集合体平均 Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242=2.1/54.5/25.0/9.3/6.4 Am241=2.7
		JENDL3.2	PWRM0205J32	Pu 富化度 5%, 最高燃焼度 60GWd/t, 集合体平均 Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242=2.1/54.5/25.0/9.3/6.4 Am241=2.7
		ORIGEN 内蔵	PWR-PUPU	Pu 富化度 4.5%, 最高燃焼度 33GWd/t, 燃料取替 3 バッチ炉心平均 Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242=2.2/49.3/25.5/14.6/8.3
	ウラン 燃料	JENDL3.3	PWR41J33	濃縮度 4.1%, 最高燃焼度 60GWd/t, 集合体平均
		JENDL3.2	PWR41J32	濃縮度 4.1%, 最高燃焼度 60GWd/t, 集合体平均
		ORIGEN 内蔵	PWR-U50	濃縮度 4.15%, 最高燃焼度 50GWd/t, 燃料取替 5 バッチ炉心平均

3. 計算方法

核データライブラリには、核分裂断面積や核分裂収率などを収録したファイル（核データと呼ぶ）、崩壊定数などを収録したファイル（崩壊データと呼ぶ）があり、それぞれを分離して使用することができる。また、燃焼計算コード ORIGEN2 は、現在一般的に使用されている ORIGEN2.1 コードにマイナーアクチニドの核分裂によって発生する核分裂生成物の計算にロジックミスがあり、最新版の ORIGEN2.2 で修正⁽⁶⁾されている。そこで、国内における最新データである JENDL3.3 に基づく ORIGEN2 用ライブラリと ORIGEN2.2 コードの組み合わせ（最新版）による炉心蓄積放射エネルギーを基準として、核データ、崩壊データおよび計算コードを変更した場合の影響を評価することとした。JENDL に使用されている崩壊データは、JENDL3.3 は JENDL Decay Data File 2000⁽¹²⁾（JNDC2000 と呼ぶ）に基づき、JENDL3.2 は JNDC Version2⁽¹³⁾（JNDC V2 と呼ぶ）に基づくものである。

計算は、UO₂ 炉心および MOX 炉心それぞれについて、炉心平均燃焼度まで燃焼させ、原子炉停止後 0 時間、2 時間、12 時間および 24 時間冷却させる方法で、核データ、崩壊データおよび計算コードを表 3 に示す 8 種類の組み合わせにして実施した。JENDL3.3 に基づく ORIGEN2 用ライブラリと ORIGEN2.2 の組み合わせ（最新版という）の計算結果を C₀ とし、他のケースとの比較を行う際の基準とした。核データの影響を評価するため、C₀ から核データを JENDL3.2 に

変更した場合の計算結果を C₁、核データを ORIGEN 内蔵に変更した場合の計算結果を C₂ とした。崩壊データの影響を評価するため、C₀ から崩壊データを JNDC V2 に変更した場合の計算結果を C₃、崩壊データを ORIGEN 内蔵に変更した場合の計算結果を C₄ とした。計算コードの影響を評価するため、C₀ から計算コードを ORIGEN2.1 に変更した場合の計算結果を C₅ とした。これまで、筆者らが使用している JENDL3.2 に基づく ORIGEN2 用ライブラリと ORIGEN2.1 の組み合わせによる炉心蓄積放射エネルギーと比較するため、この組み合わせ（INSS 版という）の計算結果を C₆ とした。一般的に用いられている ORIGEN 内蔵ライブラリと ORIGEN2.1 の組み合わせによる炉心蓄積放射エネルギーと比較するため、この組み合わせ（汎用版という）の計算結果を C₇ とした。

表3 核データライブラリと計算コードの組み合わせ

組み合わせ	核データ	崩壊データ	計算コード	結果(Bq)
最新版	JENDL 3.3	JNDC2000	ORIGEN2.2	C ₀
核データの影響	JENDL 3.2	JNDC2000	ORIGEN2.2	C ₁
	ORIGEN 内蔵	JNDC2000	ORIGEN2.2	C ₂
崩壊データの影響	JENDL 3.3	JNDC V2	ORIGEN2.2	C ₃
	JENDL 3.3	ORIGEN 内蔵	ORIGEN2.2	C ₄
計算コードの影響	JENDL 3.3	JNDC2000	ORIGEN2.1	C ₅
INSS 版	JENDL 3.2	JNDC V2	ORIGEN2.1	C ₆
汎用版	ORIGEN 内蔵	ORIGEN 内蔵	ORIGEN2.1	C ₇

計算した炉心蓄積放射エネルギーは、(1) 式により最新版 C₀ を基準にして、他の計算結果 C_i に対する変化率 (DF) を求めた。(1) 式より計算結果が正の場合は、最新版

による炉心蓄積放射エネルギーの方が大きいことを示し、負の場合はこの逆を示す。

$$DF = \frac{C_0 - C_i}{C_0} \times 100(\%) \quad i: \text{比較した計算ケース (1~7)} \quad (1)$$

比較は、核データの影響を評価することを目的とした C_0 と C_1 または C_2 の比較 (それぞれ S_1, S_2)、崩壊データの影響を評価することを目的とした C_0 と C_3 または C_4 の比較 (それぞれ S_3, S_4)、計算コードの影響を評価することを目的とした C_0 と C_5 の比較 (S_5)、現状使用されている炉心蓄積放射エネルギーデータへの影響を評価することを目的とした最新版 C_0 と INSS 版 C_6 または汎用版 C_7 の比較 (それぞれ S_6, S_7) の 7 ケースについて実施した。表 4 に比較ケースの一覧を示す。

4. 結果および考察

計算した核分裂生成物のうち原子力防災の観点か

ら重要である希ガスとヨウ素に着目して炉心蓄積放射エネルギーを比較した。各比較ケースの計算結果を表 5 に示す。なお、表 5 に示している総量は放射化核種およびアクチニド核種を含む全核種の単純合計放射エネルギー、希ガスは 0.5MeV 等価換算放射エネルギー、ヨウ素は ^{131}I 等価換算放射エネルギーである。

表 4 比較したケース

比較ケース	比較の目的	比較対象		DF 計算式 × 100 (%)
		C_0 (Bq)	C_i (Bq)	
S_1	核データの比較	JENDL 3.3	JENDL 3.2	$(C_0 - C_1)/C_0$
S_2		JENDL 3.3	ORIGEN 内蔵	$(C_0 - C_2)/C_0$
S_3	崩壊データの比較	JNDC 2000	JNDC V2	$(C_0 - C_3)/C_0$
S_4		JNDC 2000	ORIGEN 内蔵	$(C_0 - C_4)/C_0$
S_5	計算コードの比較	ORIGEN2.2	ORIGEN 2.1	$(C_0 - C_5)/C_0$
S_6	現状使用されている	最新版	INSS 版	$(C_0 - C_6)/C_0$
S_7	炉心蓄積放射エネルギーとの比較	最新版	汎用版	$(C_0 - C_7)/C_0$

表 5 各比較ケースの計算結果

比較ケース	評価対象 炉心	DF (%)											
		総量				希ガス				ヨウ素			
		0 h	2 h	12 h	24 h	0 h	2 h	12 h	24 h	0 h	2 h	12 h	24 h
S_1	UO ₂	0.17%	0.21%	0.25%	0.26%	-0.08%	-0.13%	-0.04%	0.02%	0.10%	0.10%	0.10%	0.10%
	MOX	0.17%	0.22%	0.25%	0.26%	-0.09%	-0.22%	-0.18%	-0.08%	0.11%	0.11%	0.12%	0.12%
S_2	UO ₂	1.55%	1.34%	1.32%	1.28%	2.24%	0.31%	2.93%	2.78%	0.25%	0.30%	0.34%	0.41%
	MOX	1.70%	1.58%	1.61%	1.58%	2.17%	0.96%	3.42%	3.11%	0.38%	0.43%	0.47%	0.54%
S_3	UO ₂	0.19%	0.48%	0.32%	0.17%	-0.01%	-0.26%	-0.33%	0.21%	0.00%	0.01%	0.01%	0.00%
	MOX	0.18%	0.44%	0.29%	0.16%	-0.01%	-0.25%	-0.26%	0.24%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%
S_4	UO ₂	0.23%	0.85%	0.70%	0.56%	-0.20%	1.18%	0.48%	0.01%	-0.02%	0.03%	0.11%	0.18%
	MOX	0.18%	0.83%	0.70%	0.57%	-0.20%	1.21%	0.52%	0.05%	-0.04%	0.00%	0.07%	0.15%
S_5	UO ₂	1.51%	1.33%	1.22%	1.19%	2.48%	2.50%	1.99%	1.83%	1.73%	1.73%	1.71%	1.70%
	MOX	2.50%	2.33%	2.23%	2.20%	2.70%	2.93%	3.36%	3.42%	3.49%	3.49%	3.52%	3.55%
S_6	UO ₂	1.68%	1.81%	1.58%	1.42%	2.31%	2.05%	1.57%	1.99%	1.73%	1.74%	1.73%	1.71%
	MOX	2.77%	2.94%	2.72%	2.57%	2.51%	2.35%	2.82%	3.48%	3.50%	3.51%	3.55%	3.57%
S_7	UO ₂	2.89%	3.21%	2.99%	2.80%	3.23%	2.77%	4.90%	4.29%	1.78%	1.87%	2.01%	2.17%
	MOX	4.06%	4.44%	4.28%	4.09%	4.15%	4.52%	6.85%	6.15%	3.31%	3.40%	3.55%	3.73%

4.1 核データの影響

(1) JENDL3.3 と JENDL3.2 の比較

核データを JENDL3.3 と JENDL3.2 にした場合の変化率を図 1 から図 3 に示す。UO₂ 炉心および MOX 炉

心共に全体、核種毎の希ガスおよび核種毎のヨウ素の比較結果は、いずれも 0.3% 以内に収まっている。この結果から、JENDL の改訂は炉心蓄積放射エネルギーに対してほとんど影響を与えていないことがわかる。

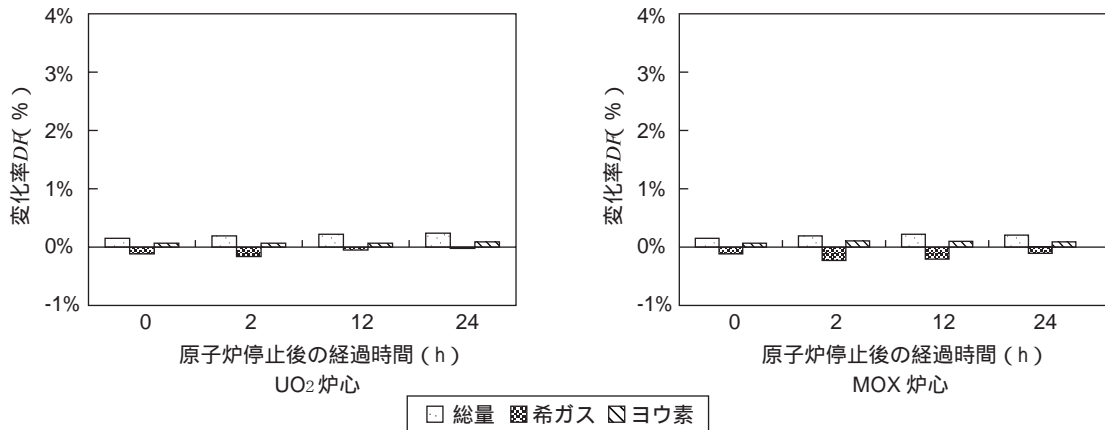


図 1 JENDL3.3 と JENDL3.2 の比較 (全体)

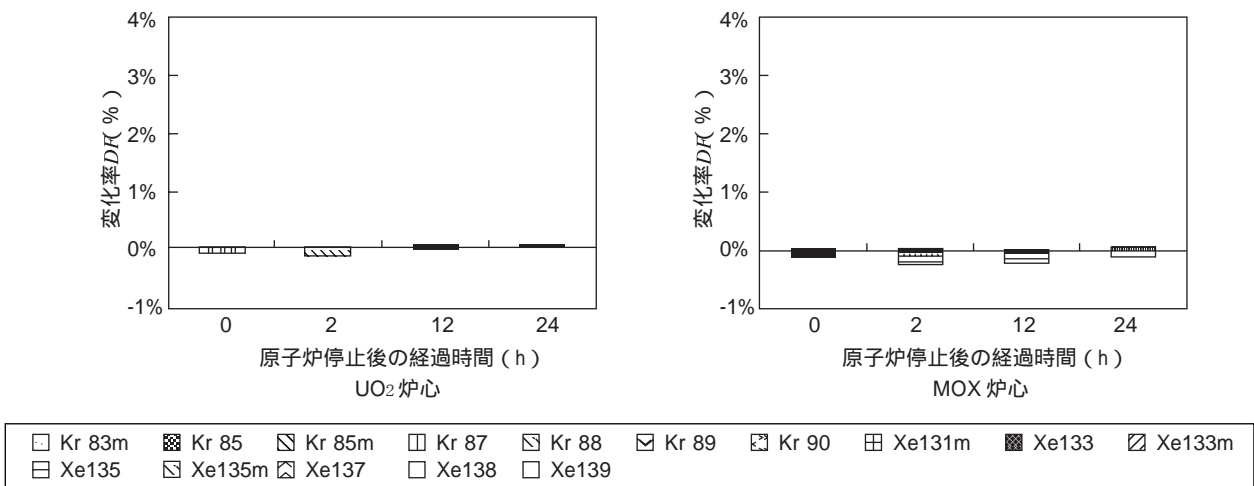


図 2 JENDL3.3 と JENDL3.2 の比較 (希ガス)

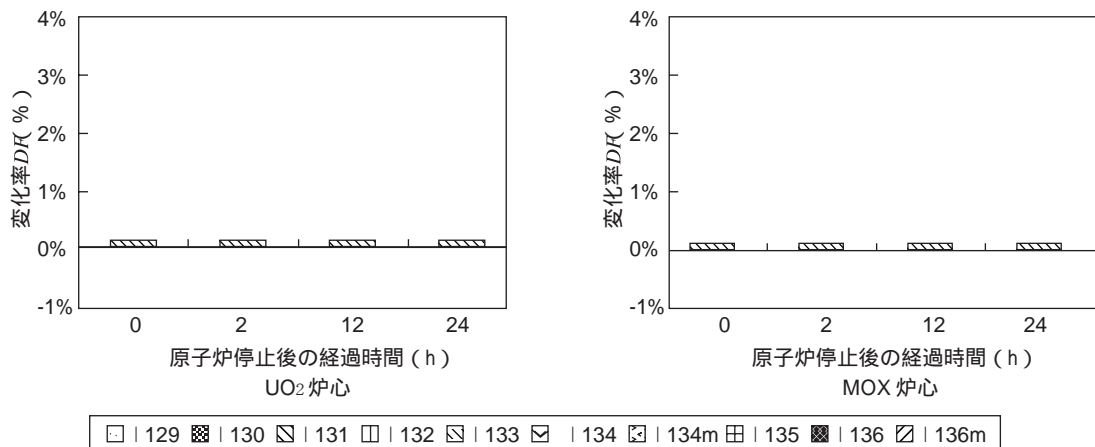


図 3 JENDL3.3 と JENDL3.2 の比較 (ヨウ素)

(2) JENDL3.3 と ORIGIN 内蔵の比較

核データを JENDL3.3 と ORIGIN 内蔵にした場合の、 UO_2 炉心および MOX 炉心の全体の変化率を図 4 に示す。総量の変化率は 1.5% 前後、ヨウ素の変化率は 0.5% 前後で一定であるのに対して、希ガスの変化率は原子炉停止後 12 時間以降増加した。核種毎の希ガスとヨウ素の変化率を図 5 および図 6 に示す。希ガ

スの変化率の中で、原子炉停止後 0 時間時点における ^{83m}Kr と ^{90}Kr 、2 時間時点の ^{88}Kr 、12 時間以降の ^{135}Xe に違いが見られる。このうち、短半減期核種については、核分裂収率の差が影響しているものと推定されるが、 ^{135}Xe については壊変によるビルドアップに差が出ているものと考えられる。

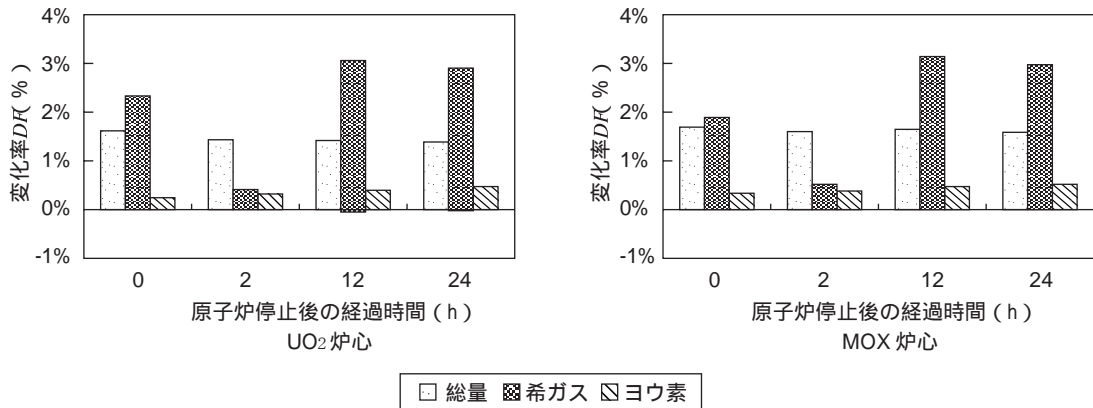


図 4 JENDL3.3 と ORIGIN 内蔵の比較 (全体)

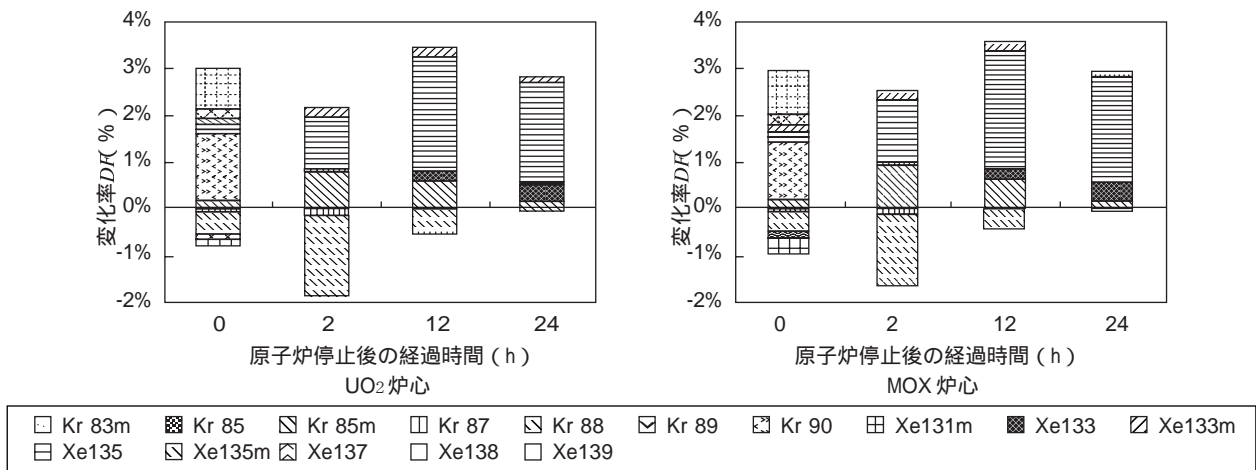


図 5 JENDL3.3 と ORIGIN 内蔵の比較 (希ガス)

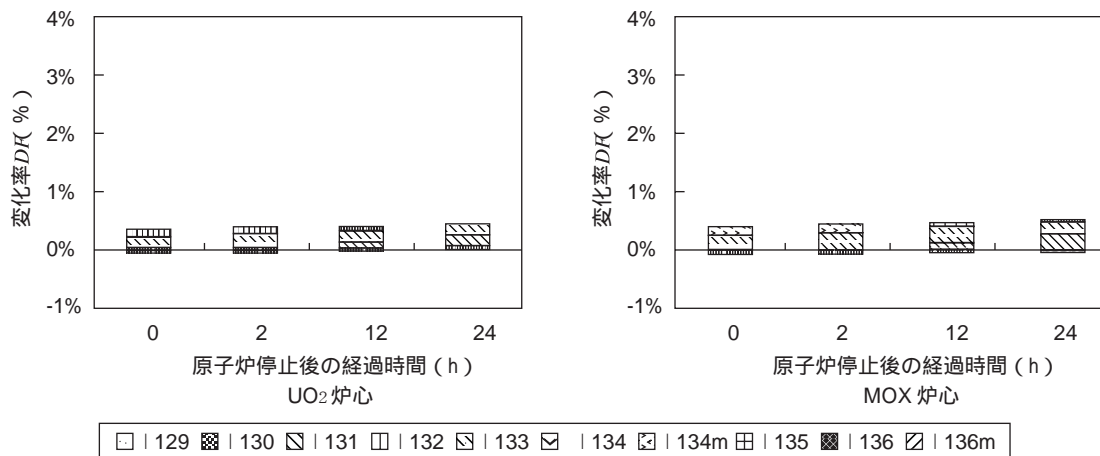


図 6 JENDL3.3 と ORIGIN 内蔵の比較 (ヨウ素)

(3) 中性子束および燃焼度依存核分裂断面積の比較

¹³⁵Xe に原子炉停止後のビルドアップと思われる傾向が確認されたので、中性子束の比較を行った。それぞれの核データを用いた場合の中性子束を図7に示す。JENDL3.3 (J33) と JENDL3.2 (J32) による中性子束には差は認められないが、ORIGEN 内蔵 (PWR-U50, PWR-PUPU) による中性子束は低くなっていることが確認された。それぞれの計算における発生エネルギー (出力) は一定としていることから、両者の核分裂数に大きな差はないため、ORIGEN 内蔵の核データは少ない中性子束で同一の核分裂数が得られるよう、核分裂断面積が大きくなっているはずである。そこで、ORIGEN2 計算に使用されている燃焼度依存核分裂断面積を比較した。図8に主要アクチノイド核種の燃焼度依存核分裂断面積を示す。図8より ORIGEN 内蔵の核データは、JENDL の核データより ²³⁵U, ²³⁹Pu および ²⁴¹Pu の燃焼度依存核分裂断面積が大きくなっており、低中性子束で同一の核分裂数が得られることがわかった。¹³⁵Xe は中性子吸収断面積が大きく、運転中には中性子吸収により壊変していたものが、原子炉停止後中性子吸収による壊変がなくなりビルドアップが発生する。よって、¹³⁵Xe の変化量の差は、JENDL と ORIGEN 内蔵の燃焼度依存

核分裂断面積の違いにより中性子束に差が発生し、これが両者のビルドアップに影響を与えて生じたものと考えられる。

以上の結果から得られた知見をまとめると、核データの違いによる炉心蓄積放射エネルギーは JENDL3.3 と JENDL3.2 の間でほとんど差はなく、JENDL と ORIGEN 内蔵では ORIGEN 内蔵の燃焼度依存核分裂断面積が JENDL より大きく、燃焼時の中性子束を低めに評価した結果、¹³⁵Xe のビルドアップが減少し、希ガスの炉心蓄積放射エネルギーが少なめに計算されたものと考えられる。

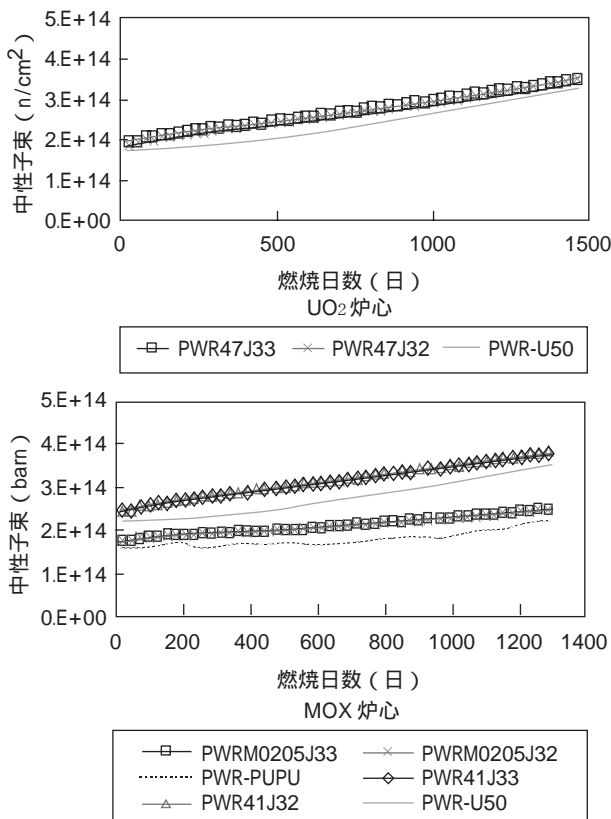


図7 中性子束の比較

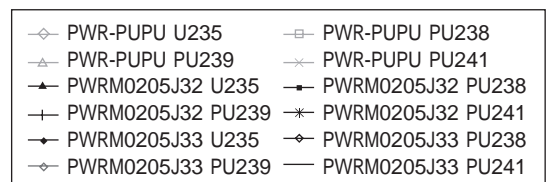
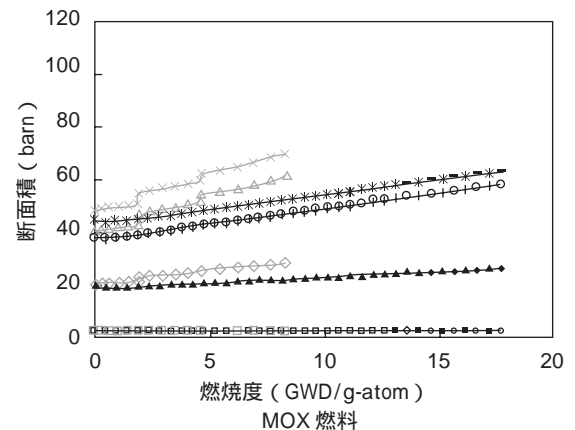
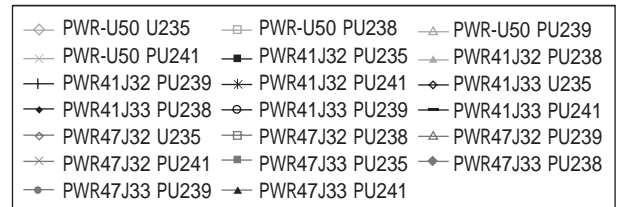
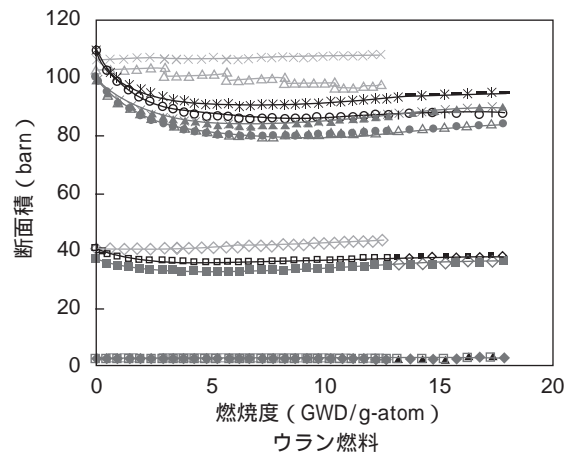


図8 燃焼度依存核分裂断面積の比較

4.2 崩壊データの影響

(1) JNDC2000 と JNDC V2 の比較

崩壊データを JNDC2000 と JNDC V2 にした場合の
変化率を 図 9 から 図 11 に示す。UO₂ 炉心および

MOX 炉心共に全体，核種毎の希ガスおよび核種毎の
ヨウ素の比較結果は，いずれも 0.5% 以内に収まって
おり，ヨウ素についてはほぼ一致していた。この結
果から，JNDC2000 と JNDC V2 は炉心蓄積放射能量
に対してほとんど差が認められなかった。

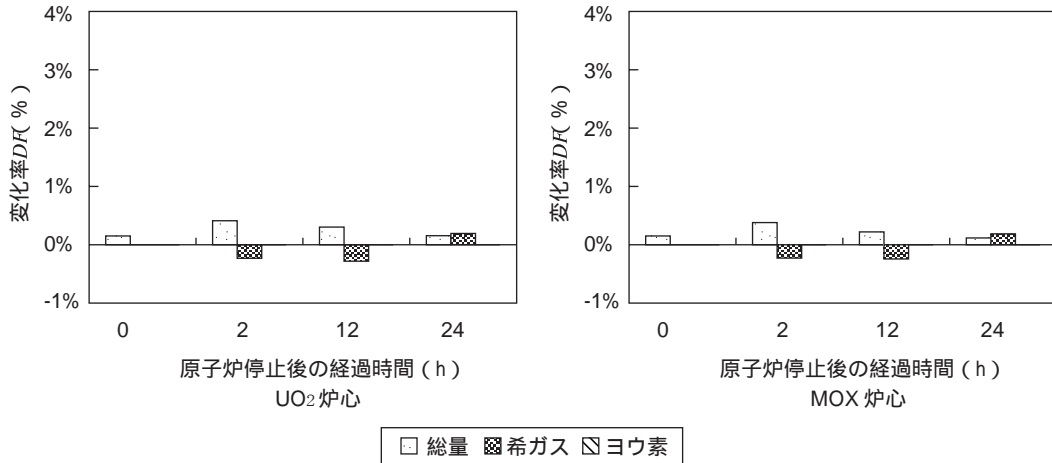


図 9 JNDC2000 と JNDC V2 の比較 (全体)

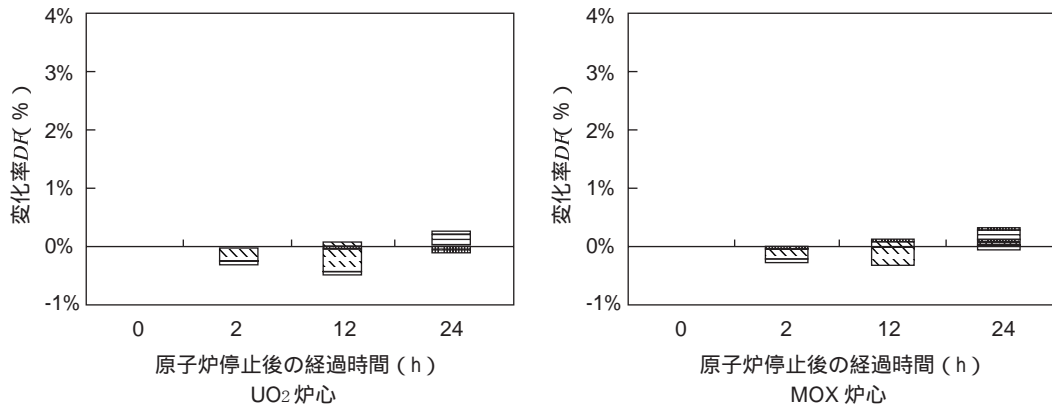


図 10 JNDC2000 と JNDC V2 の比較 (希ガス)

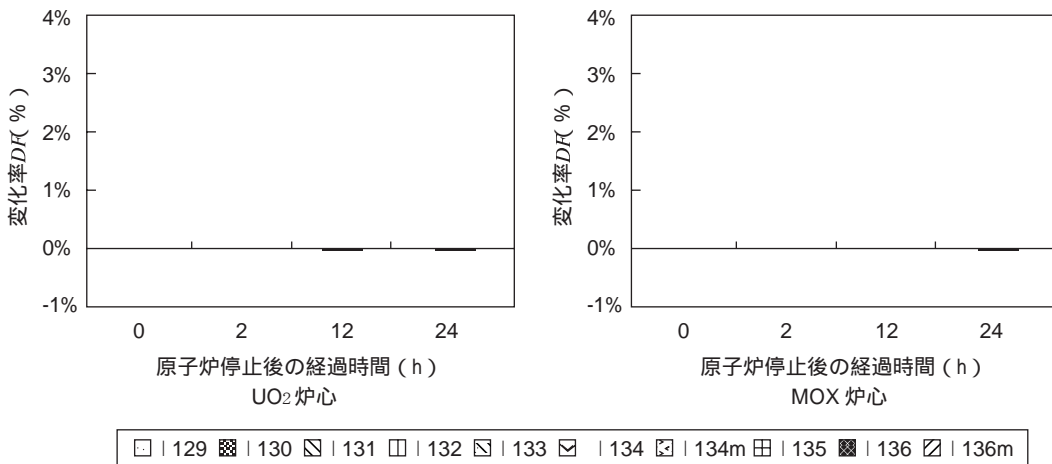


図 11 JNDC2000 と JNDC V2 の比較 (ヨウ素)

(2) JNDC2000 と ORIGIN 内蔵の比較

崩壊データを JNDC2000 と ORIGIN 内蔵にした場合の全体変化率を図 12 に示す。UO₂ 炉心および MOX 炉心共にヨウ素の変化率は 0.2% 未満であるのに対して、総量および希ガスは 2 時間時点で変化率に 1% 前後のピークが見られた。核種毎の希ガスとヨ

ウ素の変化率を図 13 および図 14 に示す。希ガスのピークは、⁸⁸Kr および ^{135m}Xe によるもので、この結果から、JNDC2000 と ORIGIN 内蔵の崩壊データのうち短半減期核種の半減期の差が影響を与えているものと考えられる。

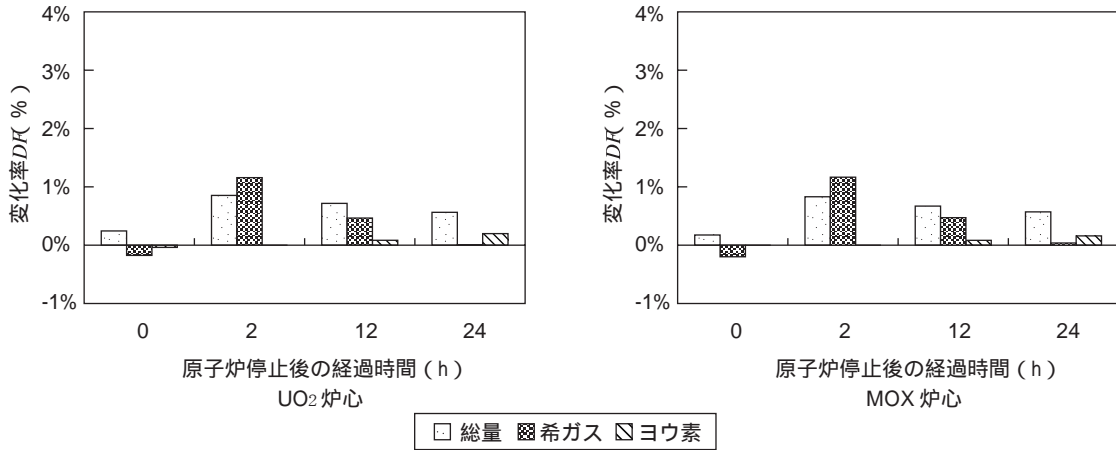


図 12 JNDC2000 と ORIGIN 内蔵の比較 (全体)

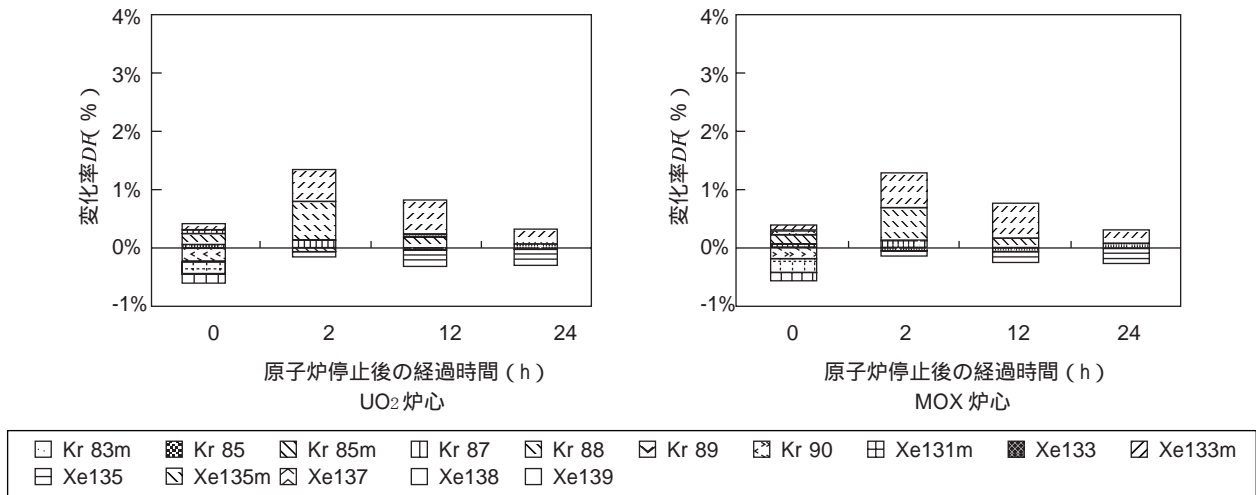


図 13 JNDC2000 と ORIGIN 内蔵の比較 (希ガス)

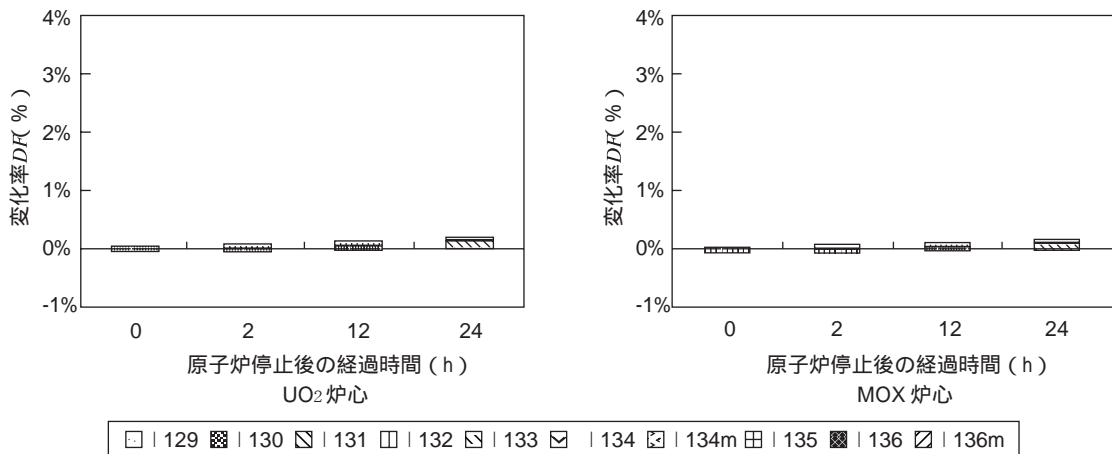


図 14 JNDC2000 と ORIGIN 内蔵の比較 (ヨウ素)

以上の結果から得られた知見をまとめると、崩壊データによる炉心蓄積放射エネルギーは、JENDLとORIGEN内蔵の短半減期核種の半減期に若干差があるため、JENDLの方が多くなったものと考えられるが、全般的に差はほとんどなく、原子力防災システムには何れの崩壊データを使用しても影響はないと判断される。しかし、データの精度を考えると最新の崩壊データを用いることが望ましいと考えられる。

4.3 ORIGEN2.2とORIGEN2.1の比較

計算コードをORIGEN2.2とORIGEN2.1にした場合の全体変化率を図15に示す。総量の変化率は、 UO_2 炉心で1.5%程度、MOX炉心で2.5%程度であるのに対して、希ガスの変化率は、 UO_2 炉心で2.5%程度、MOX炉心で3.5%程度、ヨウ素の変化率は、 UO_2 炉心で1.7%程度、MOX炉心で3.5%程度と何れも総量の変化率を上回り、MOX炉心は UO_2 炉心より変化率が大きくなる傾向を示した。核種毎の希ガスとヨウ素の変化率を図16および図17に示す。

希ガスの変化率の差は、原子炉停止後2時間までは短半減期核種が要因であるが、12時間以降は ^{85}Kr および ^{135}Xe によるものである。ヨウ素の変化率の差は、 ^{131}I および ^{133}I によるものである。これらの傾向は、アクチニド核種からの核分裂による生成量が全体的に増加していると考えられるため、表6に示すように、全体を放射化核種、アクチニド核種および核分裂生成核種別に分類して変化率みると、放射化核種およびアクチニド核種の炉心蓄積放射エネルギーは完全に一致しているのに対して、核分裂生成核種のみ

ORIGEN2.2が増加していることがわかる。これは、ORIGEN2.1のマイナーアクチニドの核分裂により生成される核種の取り扱い不備によるもので、核分裂生成核種を過小評価しているために生じたと考えられる。

しかしながら、マイナーアクチニドを多く含むMOX炉心から全MOX炉心の場合を推定するとORIGEN2.2はORIGEN2.1より総量で10%程度、希ガスおよびヨウ素は12%程度増加することになり、マイナーアクチニドの量から考えて過大評価の可能性が考えられる。

ORIGEN2.1では、マイナーアクチニド核種による核分裂生成核種の量は主要核種による核分裂生成核種の量に対して補正係数を乗算して求めており、補正係数はマイナーアクチニドと主要アクチニドの重量比を合計することにより算出する方式としていたが、最初のマイナーアクチニドを計算後バイパスされるロジックとなっていた。そこで、ORIGEN2.2のプログラム変更内容を調査した結果、補正係数の乗算は同一であるが、補正係数はマイナーアクチニドの重量と核分裂発生エネルギーの積と主要アクチニドの重量と核分裂発生エネルギーの積の比を求める方式に変更されていた。このうち、主要アクチニドの核分裂発生エネルギー計算にダミー核種(SF250)の核分裂発生エネルギーが用いられているのではないかと推定される。ダミー核種の核分裂発生エネルギーは38.4MeV、主要アクチニド核種の核分裂発生エネルギーは200MeV～210MeV程度であるため、マイナーアクチニドにより発生する核分裂生成核種は5倍余り過大評価となっている可能性がある。

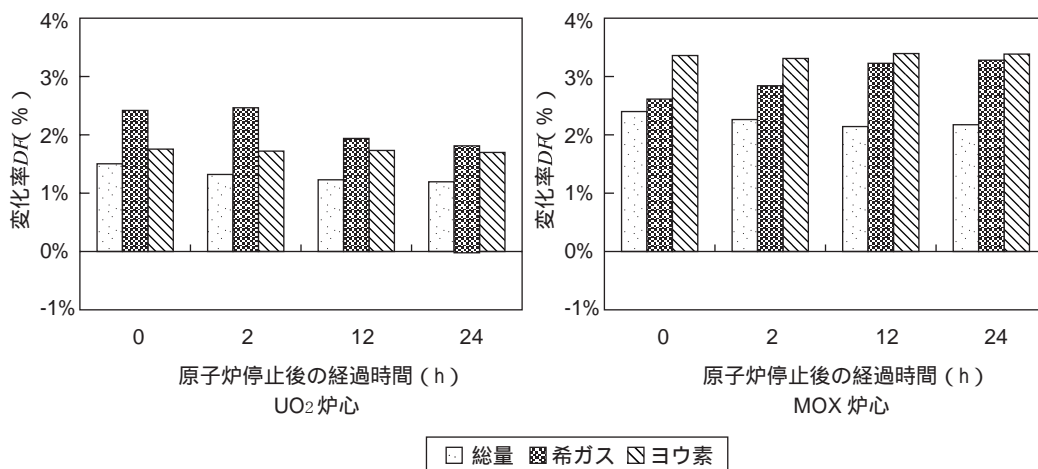


図15 ORIGEN2.2とORIGEN2.1の比較(全体)

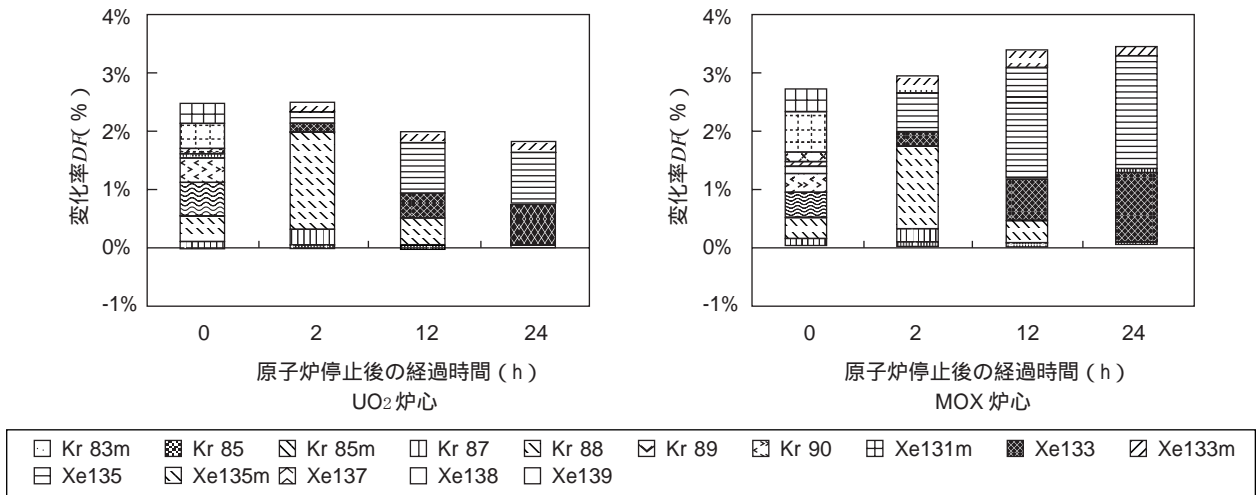


図16 ORIGEN2.2とORIGEN2.1の比較（希ガス）

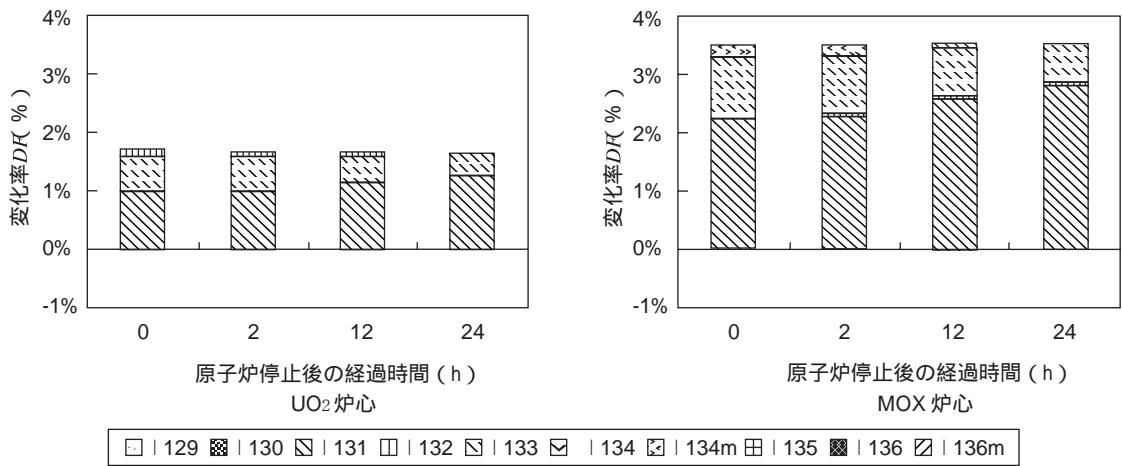


図17 ORIGEN2.2とORIGEN2.1の比較（ヨウ素）

表6 ORIGEN2.2とORIGEN2.1の比較
（放射化，アクチニド，核分裂生成核種別）

変化率 DF		原子炉停止後の経過時間			
		0時間	2時間	12時間	24時間
放射化核種	UO ₂ 炉心	0%	0%	0%	0%
	MOX 炉心	0%	0%	0%	0%
アクチニド核種	UO ₂ 炉心	0%	0%	0%	0%
	MOX 炉心	0%	0%	0%	0%
核分裂生成核種	UO ₂ 炉心	1.82%	1.78%	1.71%	1.69%
	MOX 炉心	2.95%	3.06%	3.05%	3.03%

以上の結果から得られた知見をまとめると，計算コードの違いによる炉心蓄積放射エネルギーは，ORIGEN2.1のプログラムにあった不具合によりマイナーアクチニドの核分裂生成核種をORIGEN2.2より過小評価しており，この傾向はマイナーアクチニドを含むMOX炉心の方が顕著に現れた．しかし，

ORIGEN2.2はマイナーアクチニドの核分裂により生成される核種を計算する際に，核分裂エネルギーの取り扱いに不具合があるものと考えられ，核分裂生成核種の量を過大評価している可能性がある．

4.4 現状使用されている炉心蓄積放射エネルギーへの影響

(1) 最新版とINSS版の比較

現在原子力安全システム研究所で筆者らが使用しているINSS版および最新版による炉心蓄積放射エネルギーを比較した結果を図18~20に示す．最新版は，INSS版に比べて総量，希ガスおよびヨウ素ともに増えており，原子力防災システムに大きな影響を与えるものではないが，INSS版の評価結果には保守性がないことがわかった．その主たる原因は，ORIGEN2.1のマイナーアクチニドによる核分裂生成核種の過小評

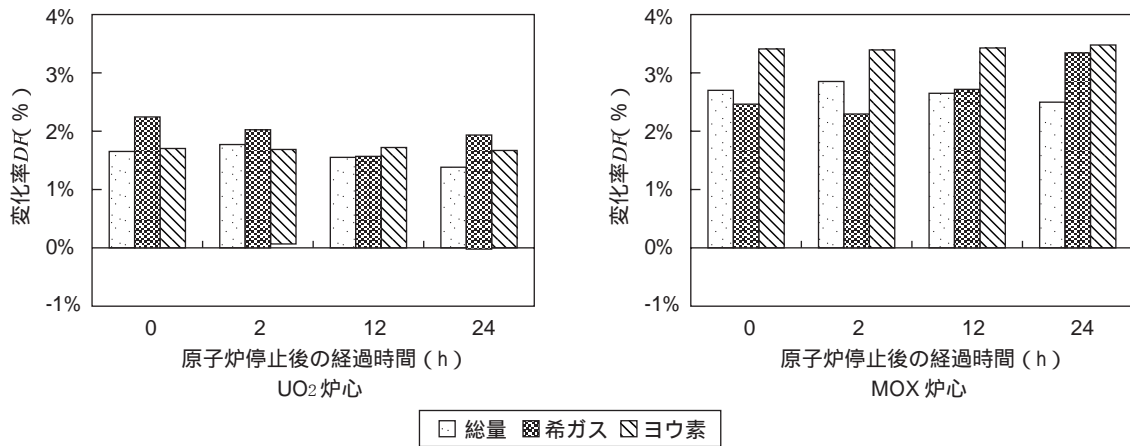


図18 最新版とINSS版の比較(全体)

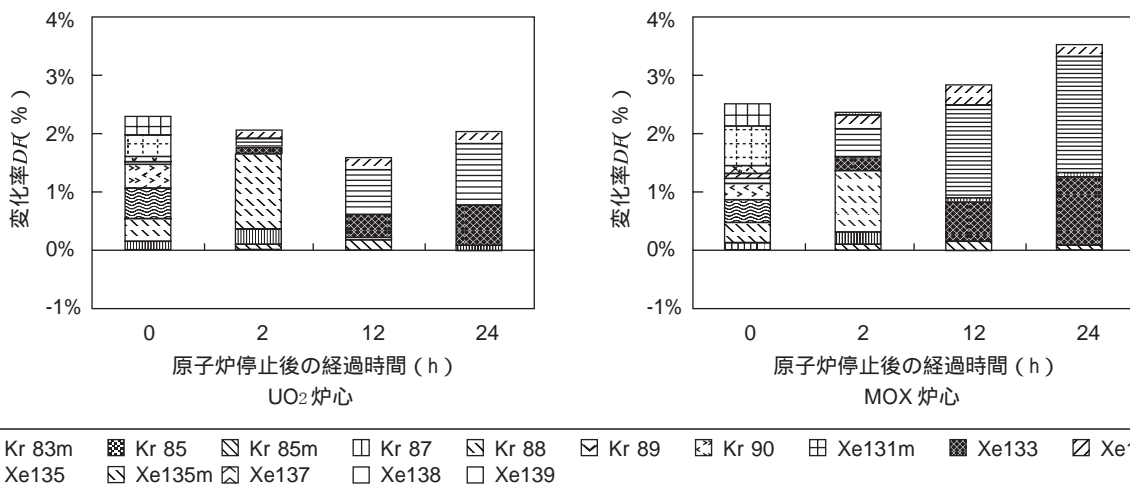


図19 最新版とINSS版の比較(希ガス)

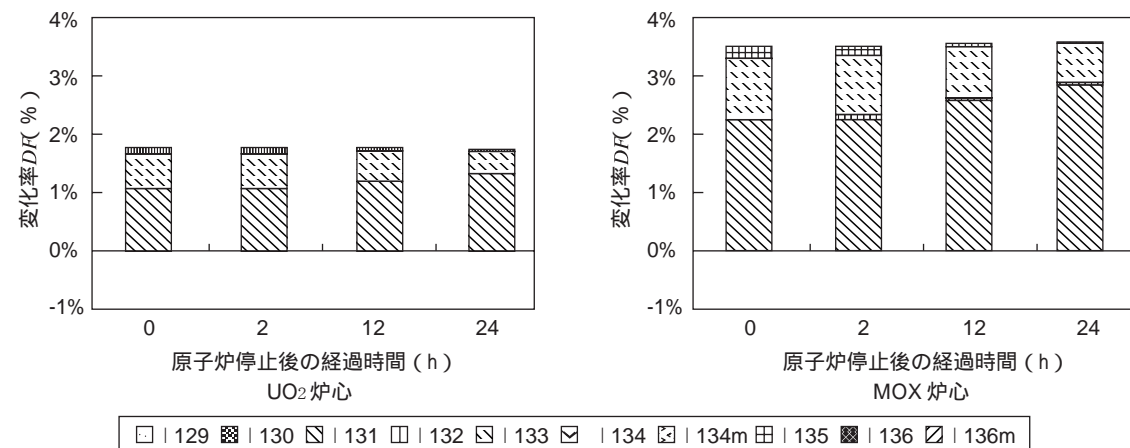


図20 最新版とINSS版の比較(ヨウ素)

価のためである。この傾向は、UO₂炉心に比べてマイナーアクチノイドが多く含まれるMOX炉心で顕著となった。

(2) 最新版と汎用版の比較

一般の原子力防災システムに使用されている汎用版および最新版の炉心蓄積放射エネルギーを比較した結果

を図21~23に示す。最新版は、汎用版に比べて総量、希ガスおよびヨウ素ともに増えており、変化率の最大値は6%を超えている。このことから、原子力防災システムに大きな影響を与えるものではないが、汎用版の評価結果には保守性がないことがわかった。その主たる原因は、核データの違いによる影響と

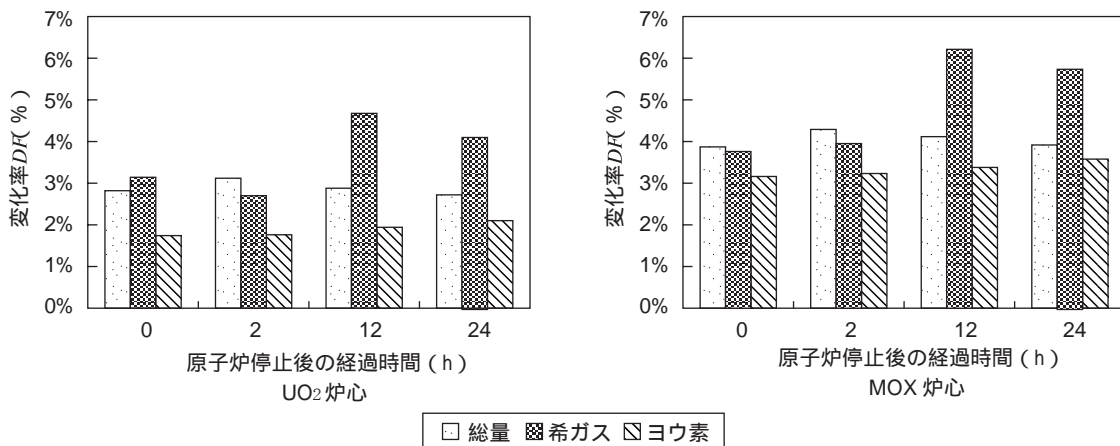


図21 最新版と汎用版の比較 (全体)

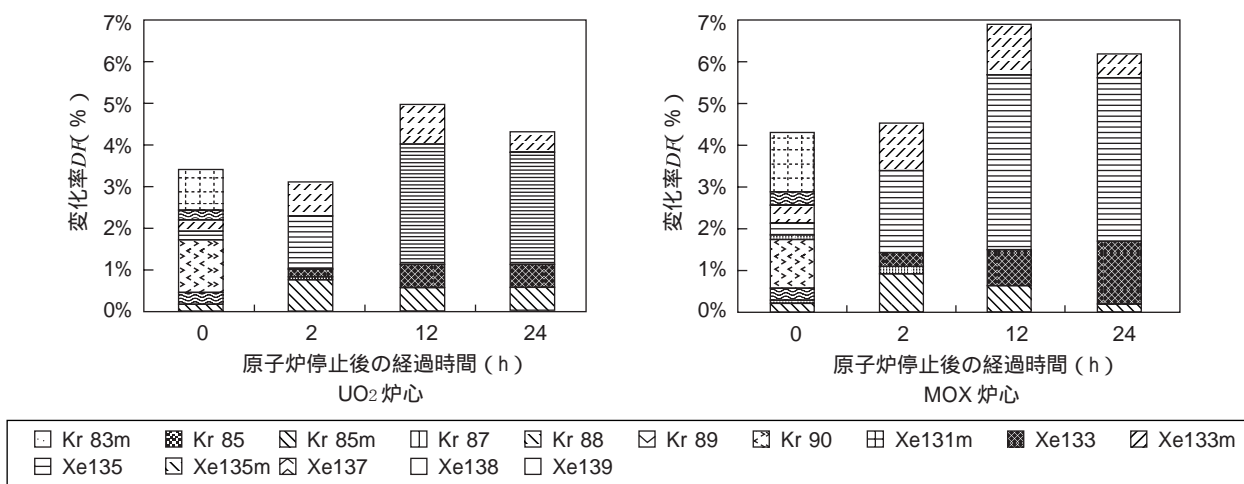


図22 最新版と汎用版の比較 (希ガス)

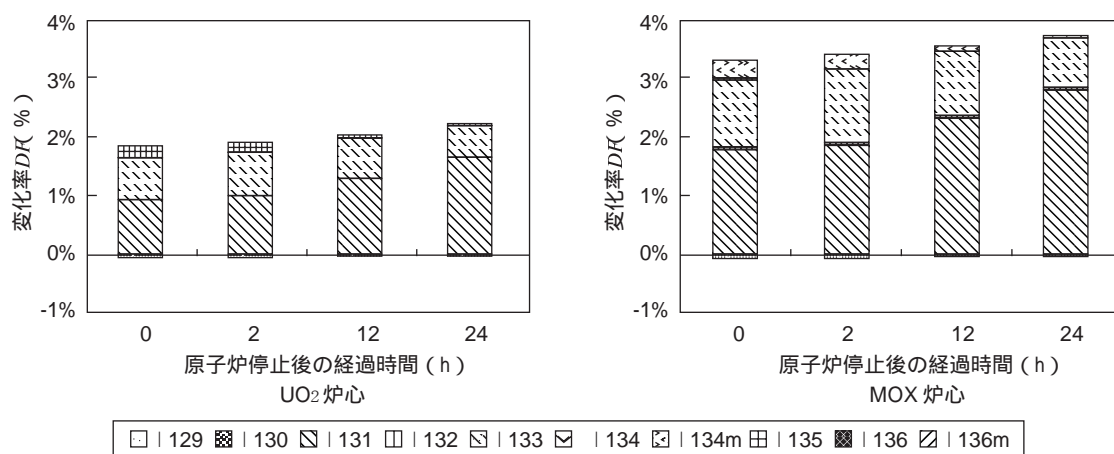


図23 最新版と汎用版の比較 (ヨウ素)

ORIGEN2.1のマイナーアクチニドによる核分裂生成核種の過小評価のためである。この傾向は、UO₂炉心に比べてマイナーアクチニドが多く含まれるMOX炉心で顕著となった。

以上の比較結果から得られた知見をまとめると、

ORIGEN2コードを用いて一般的に使用されている汎用版、原子力安全システム研究所の原子力防災システムに使用しているINSS版および最新の核データライブラリと最新の計算コードを用いた最新版による炉心蓄積放射エネルギーを比較し、保守性の有無を確認した結果、最新版を用いた炉心蓄積放射エネルギーは汎用版

および INSS 版を用いた結果より多くなり、汎用版および INSS 版の炉心蓄積放射エネルギーに保守性は認められなかった。しかし、その差は10%以内であり、原子力防災システムには放射性物質の移行挙動に大きな不確かさが含まれており、全体の計算精度を考えると大きな影響を与えるものではないと考えられる。原子力防災システムで用いる炉心蓄積放射エネルギーは、既存の核データライブラリと ORIGEN2.1 による評価結果に保守性が認められないこと、最新の核データライブラリはより信頼性が高くなっていると考えられること、ORIGEN2.1 コードには不具合があることから、JENDL3.3 に基づく ORIGEN2 用ライブラリと ORIGEN2.2 コードの組み合わせによる評価結果を用いることが推奨される。

5. 結言

本研究では、核データライブラリや計算コードの違いによる炉心蓄積放射エネルギーの計算結果への影響を評価し、以下の成果が得られた。

- (1) 核データの違いによる炉心蓄積放射エネルギーは JENDL3.3 と JENDL3.2 の間でほとんど差はなく、JENDL と ORIGEN 内蔵では ORIGEN 内蔵の燃焼度依存核分裂断面積が JENDL より大きく、燃焼時の中性子束を低めに評価した結果、 ^{135}Xe のビルドアップが減少し、希ガスの炉心蓄積放射エネルギーが少なめに計算されたものと考えられる。
- (2) 崩壊データによる炉心蓄積放射エネルギーは、JENDL と ORIGEN 内蔵の短半減期核種の半減期に少し差があるため、JENDL の方が多くなったものと考えられるが、全般的に差はほとんどなく、原子力防災システムには何れの崩壊データを使用しても影響はないと判断される。
- (3) 計算コードの違いによる炉心蓄積放射エネルギーは、ORIGEN2.1 のプログラムの不具合によりマイナーアクチニドの核分裂生成核種を ORIGEN2.2 より過小評価しており、この傾向は UO_2 炉心に比べてマイナーアクチニドを含む MOX 炉心の方が顕著に現れた。しかし、ORIGEN2.2 はマイナーアクチニドの核分裂により生成される核種を計算する際に、核分裂エネルギーの取り扱いに不具合があるものと考えられ、マイナーアクチニドにより発生する核分裂生成核種は5倍余り過大評価している可能性がある。
- (4) ORIGEN2 コードを用いて一般的に使用されてい

る汎用版、原子力安全システム研究所の原子力防災システムに使用している INSS 版および最新の核データライブラリと最新の計算コードを用いた最新版による炉心蓄積放射エネルギーを比較し保守性の有無を確認した結果、最新版を用いた炉心蓄積放射エネルギーは汎用版および INSS 版を用いた結果より多くなり、汎用版および INSS 版の炉心蓄積放射エネルギーに保守性は認められなかった。しかし、その差は10%以内であり、全体の計算精度を考えると大きな影響を与えるものではないと考えられる。原子力防災システムで用いる炉心蓄積放射エネルギーは、既存の核データライブラリと ORIGEN2.1 による評価結果に保守性が認められないこと、最新の核データライブラリはより信頼性が高くなっていると考えられること、ORIGEN2.1 コードには不具合があることから、JENDL3.3 に基づく ORIGEN2 用ライブラリと ORIGEN2.2 コードの組み合わせによる評価結果を用いることが推奨される。

謝辞

本研究にあたり、日本原子力研究所核データセンター片倉純一室長には、JENDL3.3 に基づく ORIGEN2 用ライブラリを提供頂いた。コンピュータソフト開発(株)蜂谷尚之氏には、ORIGEN2 コードによる解析評価方法について助言を頂いた。ここに厚く感謝します。

文献

- (1) 吉田至孝, 入江隆, 郡山民男 他: “シビアアクシデント時従業員被ばく線量評価手法の検討”, 日本原子力学会和文論文誌, 1 [2], pp.191-201, (2001).
- (2) 経済産業省: 緊急時対策支援システム Emergency Response Support System, 原子力安全・保安院パンフレット.
- (3) 茅野政道, 石川裕彦, 甲斐倫明 他: SPEEDI: 緊急時環境線量情報予測システム, JAERI-M 84-050, (1984).
- (4) A. G. Coff: Users Manual for the ORIGEN2 Computer Code, ORNL/TM-7175, (1980).
- (5) S. B. Ludwig: ORIGEN2 Version2.1 Release Notes, CCC-371/ALLCP/02, (1991).

- (6) S. B. Ludwig, A. G. Coff : Revision to ORIGEN2 Version 2.2, CCC-371/ORIGEN2.2, (2002).
- (7) K. Shibata, T. Kawano, T. Nakagawa, et al.: “ Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version3 Revision-3 : JENDL3.3” , J. Nucl. Sci. Technol. 39 [115], (2002).
- (8) T. Nakagawa : “ JENDL-3 Revision 2” , Proceedings of the 1993 Symposium on Nuclear Data, November 18-19 1993, Tokai, Japan, JAERI-M 94-019, (1994).
- (9) 須山賢也 , 片倉純一 , 大川内靖 他 : JENDL3.2 に基づく ORIGEN2 用ライブラリ :ORLIBJ32, JAERI-Data/Code 99-003, (1999).
- (10) 須山賢也 , 尾上昌晃 , 松本英樹 他 : JENDL3.2 に基づく軽水炉 MOX 燃料用 ORIGEN2 ライブラリ , JAERI-Data/Code 2000-036, (2000).
- (11) 片倉純一 , 片岡理治 : “ JENDL-3.3 に基づく ORIGEN2 コード用軽水炉断面積ライブラリーの作成 ” , 日本原子力学会 2003 秋の大会予稿集 第Ⅱ分冊 D48, p271, (2003).
- (12) J. Katakura, T. Yoshida, K. Oyamatsu, et al. : JENDL FP Decay Data File 2000, JAERI-1343, (2001).
- (13) K. Tasaka, J. Katakura, H. Ihara, et al. : JNDC Nuclear Data Library of Fission Products - Second Version, JAERI-1320, (1990).