

## &lt;第41回炉物理夏期セミナー報告&gt;

若手研究会報告

## Cmの核特性に関する研究

東京都市大学 工学部 環境エネルギー工学科

原子炉工学研究室 4年 木村礼

## 1. 緒言

原子力発電に関わる種々の問題のうち、将来に亘って問題になるのは使用済み燃料から出てくる高レベル放射性廃棄物の問題である。この中でもマイナーアクチニド (MA) には良い核特性を持つ核種があるため、MA 再利用により、MAの消滅処理・炉心特性の向上が考えられる。但し、MAは一般的に崩壊熱が高い。そこで、この崩壊熱によって燃料を作る事が出来ると考えられる許容値内 (20W/kg-HM)<sup>1)</sup> で MA を添加し、燃焼特性の改善を図る。これまでの研究で、<sup>244</sup>Cm と <sup>245</sup>Cm の半減期の差を利用し、冷却期間を置く事によって fissile である <sup>245</sup>Cm が実効的に濃縮される効果がある事が分かっている。また、半減期による <sup>244</sup>Cm の減少により Cm の持つ崩壊熱も低下する。これまでの Cm 燃料の燃焼特性に関する研究を踏まえ<sup>2)</sup>、冷却期間中の <sup>244</sup>Cm の減少による崩壊熱の低下及び <sup>245</sup>Cm の相対的な増加による核特性向上を利用して、燃焼度を従来より 10GWd/t 程度高くする事を、本研究の目的とする。

## 2. 冷却による Cm の特性変化

我々のこれまでの研究によって、Cm は冷却期間を置く事でその核特性が変化する事が分かっている。これは Cm 同位体の大部分を占める <sup>244</sup>Cm と核分裂性核種である <sup>245</sup>Cm の半減期が大きく異なる事に由来する現象である。Table I に、主な Cm 同位体の熱領域核分裂断面積、半減期、崩壊熱を示す。

Table I, Curium isotopes thermal cross section, half life and decay heat

	<sup>244</sup> Cm	<sup>245</sup> Cm	<sup>246</sup> Cm
thermal fission cross section[b]	1.037	2.142E+03	1.442E-01
half life[y]	1.81E+01	8.5E+03	4.7E+03
decay heat[W/kg]	2.8E+03	5.7	10

ここから、半減期 8500 年の <sup>245</sup>Cm に比べ、<sup>244</sup>Cm は 18.1 年と半減期が短い事が分かる。使用済み燃料を冷却すると、その使用済み燃料中の Cm の組成は <sup>244</sup>Cm が  $\alpha$  崩壊によって

減少して行き、相対的に核分裂性核種 (主に  $^{245}\text{Cm}$ ) の割合が上昇して行く (Fig.1, Fig.2)。つまり、使用済み燃料を冷却することによって実効的に Cm の核分裂核種の濃縮を行ったのと同等の効果が得られる事がこの結果から分かった。

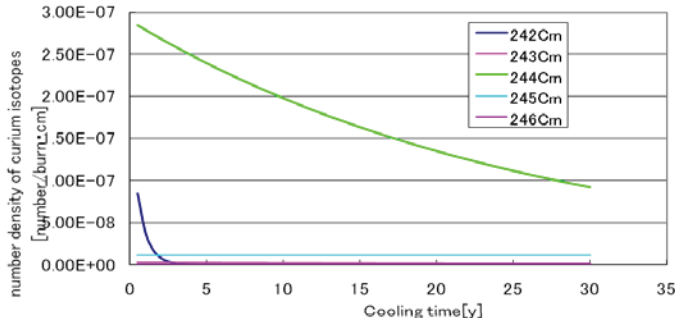


Fig.1: Quantity of  $^{242}\text{Cm}\sim^{246}\text{Cm}$  until to cool

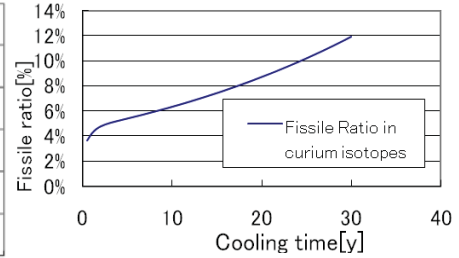


Fig.2: Fissile ratio in curium

### 3. 線出力による効果

Fig.3 に Cm の燃焼に関わる主要な燃焼チェーンを示す。

燃料として Cm を用いた時に、その主な核種である  $^{244}\text{Cm}$  は  $^{240}\text{Pu}$  へ  $\alpha$  崩壊して行く。 $^{244}\text{Cm}$  の半減期は短いため、 $^{240}\text{Pu}$  は蓄積する。 $^{240}\text{Pu}$  は 289.1burn で (n, $\gamma$ ) 反応を起こし、 $^{241}\text{Pu}$  に変化する。この  $^{241}\text{Pu}$  は核分裂核種なので、最大燃焼度を増大させる効果が生じる。また、 $^{244}\text{Cm}$  の崩壊

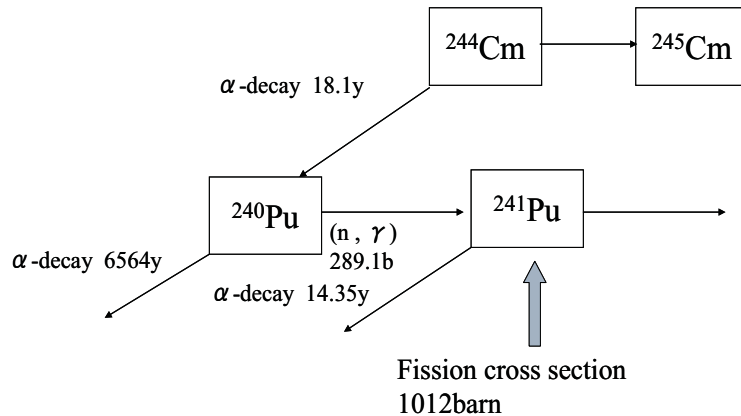


Fig.3 Main Burn up chain of

は自然に起こる事象であるが、 $^{240}\text{Pu}$  の (n, $\gamma$ ) 反応は中性子 flux のレベルに正の相関を持つ。従って、線出力を高める事で Cm 燃料の最大燃焼度をより高める事が出来る。この効果は  $^{244}\text{Cm}$  に起因する物であり、 $^{244}\text{Cm}$  の割合が多ければ多い、つまり冷却期間が短い程顕著に現れる。これは Fig.4 において線出力を 180W/Cm, 440W/Cm としたそれぞれで、30年、及び 140年冷却した使用済み燃料から取り出した純粋な Cm (それぞれ 30y Cm, 140y Cm と称する) を燃焼させた時、30y Cm の方が線出力を高めた時の効果が大きい事から分かる。

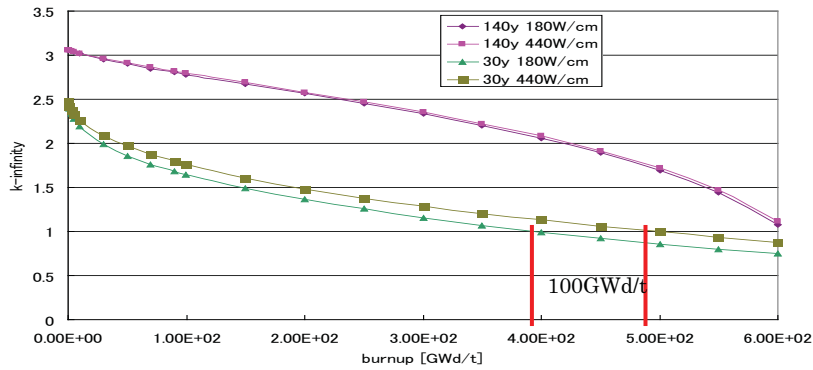


Fig 4 Burn up behavior to imaginary curium fuel; from 140y and 30y cooled

しかしながら Cm は崩壊熱が高く、冷却期間を短くとした場合はよりそれに対する考慮をする必要がある。従って、本研究ではより現実的な燃料を考える為に、U 燃料に少量の Cm を添加することとし、U 燃料に添加出来る Cm の限界量を崩壊熱の制限値を用いて決定した。

#### 4. 計算手法

Fig.5 に本研究の計算手法を示す。

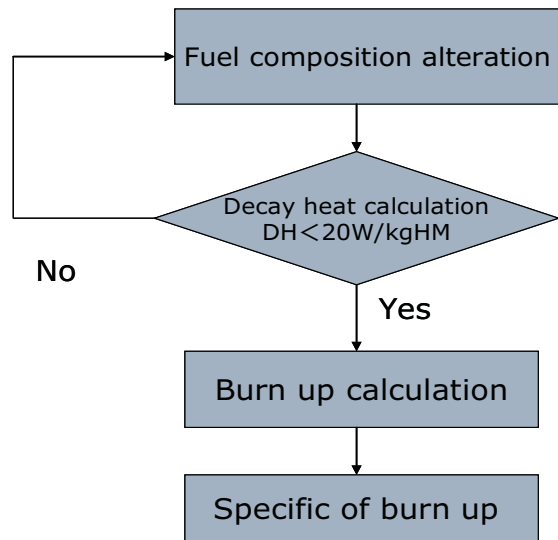


Fig.5 flow chart of analysis

計算手法は以下の手順で行った。①:U 燃料への Cm の添加割合を変化させ、1kg-HM 当たりの崩壊熱を算出した。但し、U 燃料の濃縮度は 3%とした。②:これを冷却期間の異なる複数の組成の Cm(以下、○○年冷却した使用済み燃料由来の Cm を○○yCm と表記)に対して行い、基準値の地点での Cm 添加可能割合を求めた。③:求めた各冷却期間由来の Cm を添加可能割合まで U 燃料に添加し、SRAC95 衝突確率計算ルーチン PIJ を用いて燃焼計算を行った。

また、核データライブラリは JENDL-3.3 を用いた。④:③で得られた燃焼特性の評価を行った。また、この時崩壊熱計算に用いた式を以下に示す。

$$DH[W / kg - HM] = \frac{\sum W_U \cdot DH_U + \sum W_{Cm} \cdot DH_{Cm}}{W}$$

$$W[kg] = \frac{1}{1000 \cdot L} \left( \sum N_U \cdot A_U + \sum N_{Cm} \cdot A_{Cm} \right)$$

$$W_U[kg] = \frac{1}{1000 \cdot L} \sum N_U \cdot A_U$$

$$W_{Cm}[kg] = \frac{1}{1000 \cdot L} \sum N_{Cm} \cdot A_{Cm}$$

$N_U$ : 各U同位体の数密度  
 $A_U$ : 各U同位体の質量数  
 $N_{Cm}$ : 各Cm同位体の数密度  
 $A_{Cm}$ : 各Cm同位体の質量数  
 $DH_U$ : 各U同位体の崩壊熱[W/kg]  
 $DH_{Cm}$ : 各Cm同位体の崩壊熱[W/kg]  
 $L$ : アボガドロ定数

さらに、燃焼計算で用いた体系を Fig.6 に示す。燃焼計算はこのようなピンセル構造の無限体系で行った。

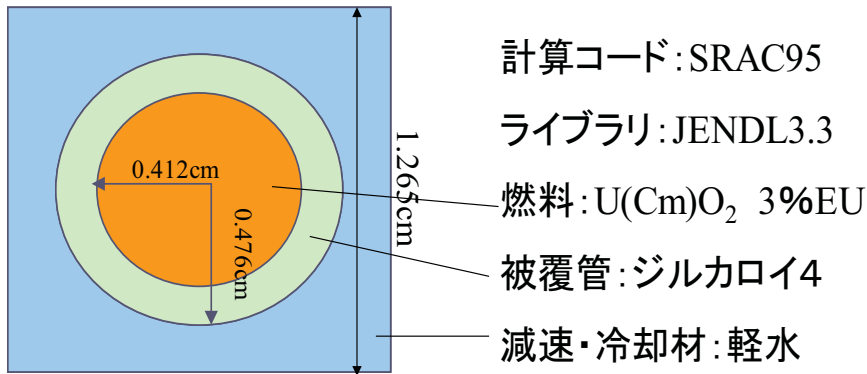


Fig.6 Calculation composition

## 5. 計算結果

### 5. 1 崩壊熱計算に関する結果

Fig.7 に、各冷却期間を置いた使用済み燃料からの Cm を添加した U 燃料の崩壊熱計算の結果を示す。横軸が Cm の HM 全体に対する添加量であり、縦軸が崩壊熱である。但し、崩壊熱の単位は[W/kg-HM]とした。また、30yCm や 40yCm はそれぞれ 30 年冷却した使用済み燃料から取り出した Cm を意味する。

この図から分かるように、冷却期間が短い方が同じ添加量での崩壊熱は高く、冷却期間が長くなり崩壊熱が低減すればより多くの Cm を添加することが出来る。今回は崩壊熱の上限値として Kawaguchi, K. et al, GLOBAL 2007, Boise, (2007) p.290-295, in CD-ROM. に示され

る,20[W/kg-HM]を採用した。

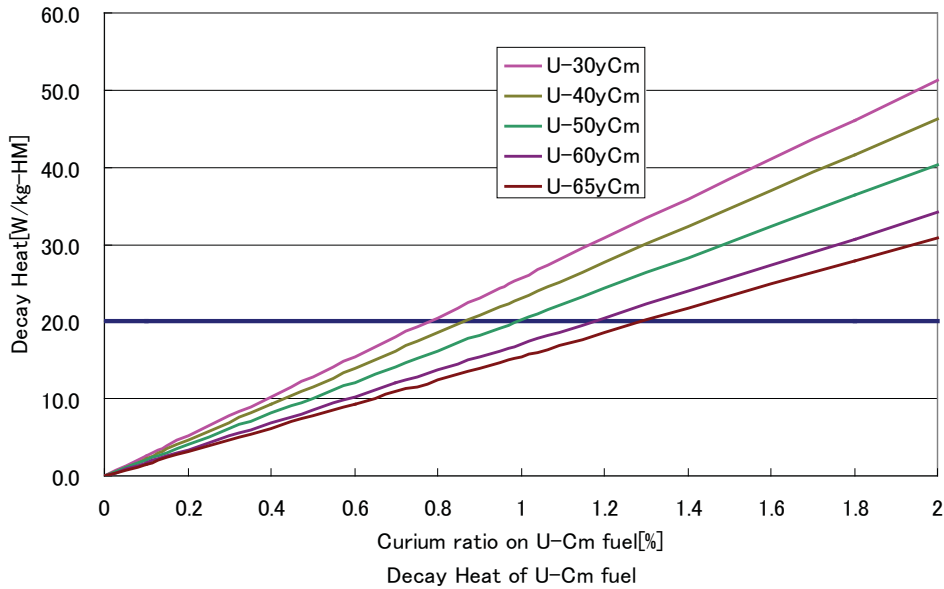


Fig.7 Decay Heat of U-Cm fuel

また、今回は各計算パターンについて崩壊熱が採用した崩壊熱の上限値と一致する時の Cm の添加量を求めた。その結果について Table II に示す<sup>(2)</sup>。また、各冷却期間由来の Cm について、その添加量での燃焼計算を行った。

Condition	Add Curium ratio
U-30yCm	0.780%
U-40yCm	0.865%
U-50yCm	0.989%
U-60yCm	1.17%
U-65yCm	1.29%

### 5. 2 Cm を添加した U 燃料の燃焼計算に関する結果

U-30yCm から、U-50 y Cm までの燃焼度による無限増倍率変化を Fig.8 に示す。一番下は一般的な PWR の同特性である。一般的な PWR に比べ、Cm を添加した燃料は最大燃焼度が伸びている事が分かる。また、3章で述べたように、Cm は線出力を高めた場合に燃焼度が伸びる事が分かっている。そこで、Fig.8 の Cm 添加燃料を、線出力を 1.5 倍に高めて計算した結果及び、比較のための Fig.8 と同様のグラフを Fig.9 に示す。

Fig.9 から、U に Cm を添加した燃料は、線出力を高めても最大燃焼度が高まる効果が殆

ど見られない事が分かる。これは、添加されている Cm の絶対量が多くても 1.3%程度とごく微量なため、<sup>244</sup>Cm からの燃焼チェーンによる効果が発揮されなかった。という事が原因として考えられる。

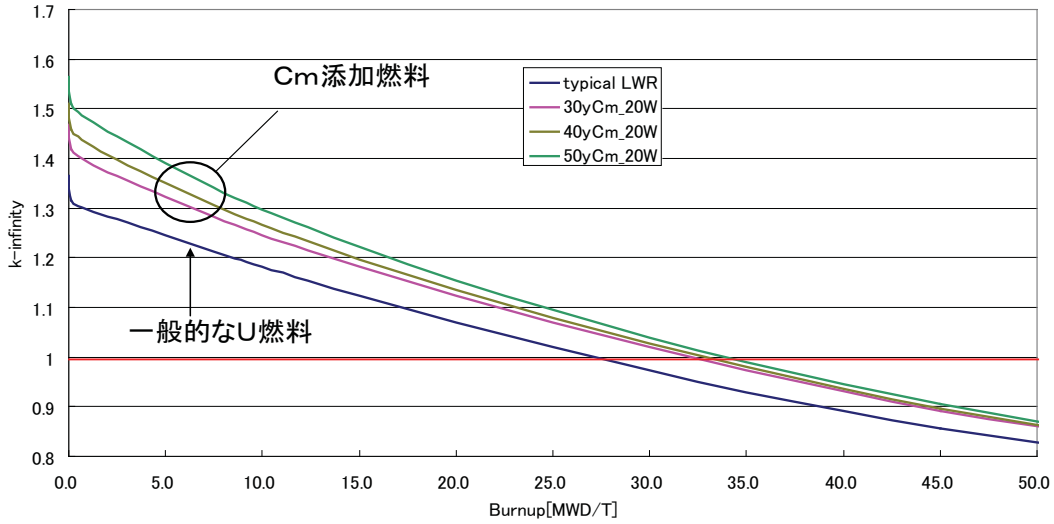


Fig.8 Burn up behavior of U-Cm fuel

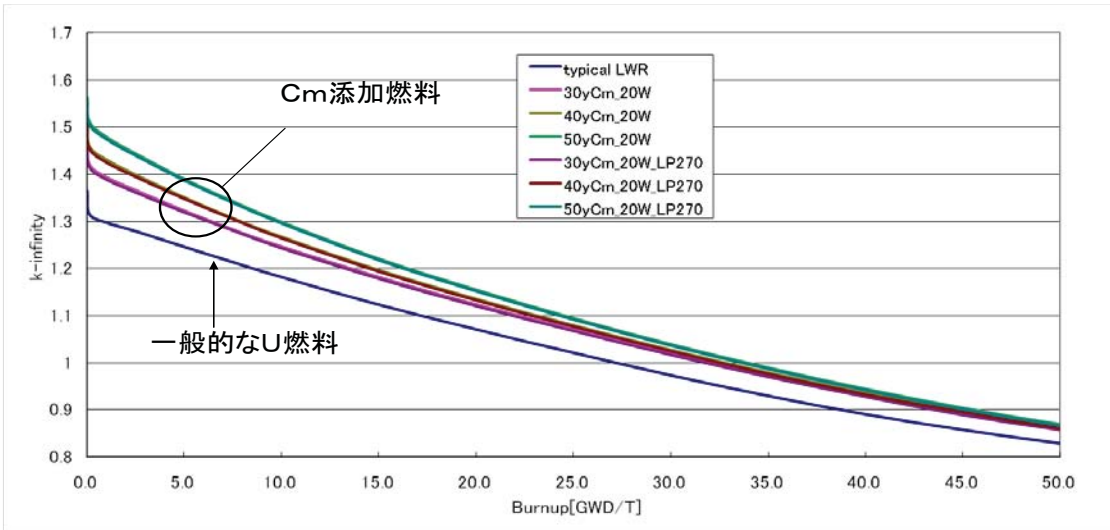


Fig.9 Burn up behavior of U-Cm fuel when liner power 180W/Cm to 270W/Cm

従って、Cm を添加して最大燃焼度が伸びる効果は、核分裂性核種である <sup>245</sup>Cm に由来するものと考えられる。従って、U 燃料に Cm を添加する場合は、一つは冷却期間を長くおく事によって、より Cm 中の核分裂性核種の割合が高まる、もう一つは崩壊熱が低くなり、より多くの Cm を添加できるため、結果的に多くの核分裂性核種が燃料に添加されるという2つの効果から冷却期間が長い Cm を用いた方が最大燃焼度を高める効果が高くなると予想される。

そこで、さらに冷却期間をおいた U-60y Cm 及び U-65yCm について、同様の燃焼計算を行った。その結果を Fig.10 に示す。

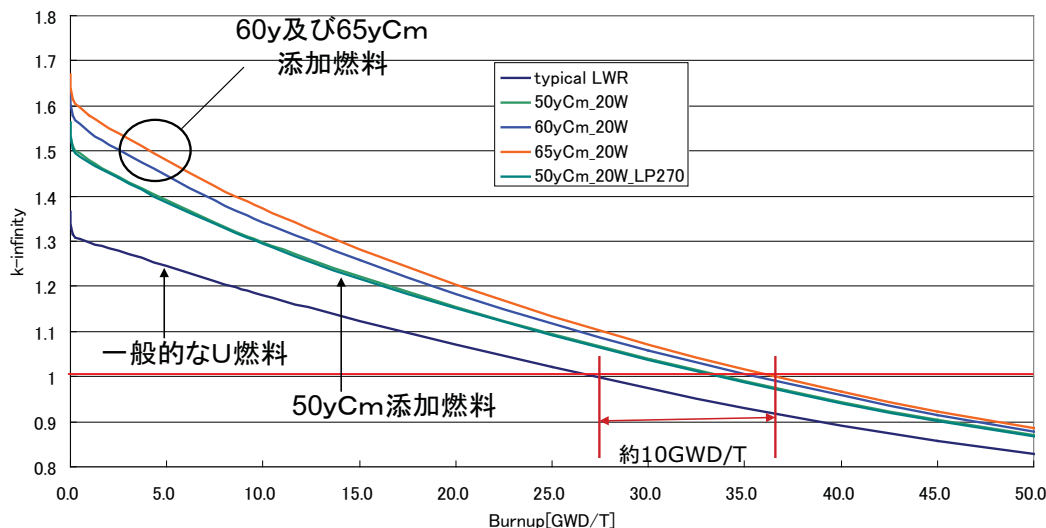


Fig.10 Burn up behavior of 60y and 65y U-Cm fuel

先の予想の通り、冷却期間が長い使用済み燃料からの Cm を用いた方がより最大燃焼度が高まり、U-65yCm 燃料では、最大燃焼度の伸びが約 10GW d/t となることも分かった。

## 6. 結言

これまでの結果から、以下の事が判明した。

- ① 高レベル放射性廃棄物である Cm を用いて、U 燃料の燃焼度を 10GWd/t 程度高める事が出来た。
- ② 全炉心 Cm の炉と異なり、U 燃料に Cm を添加する場合は、より冷却期間が長い使用済み燃料からの Cm を用いる方が良い。これは Cm の添加量が少なくなる為、<sup>244</sup>Cm からの燃焼チェーン効果が顕著には現れない事、冷却による実効的な濃縮の効果及び、崩壊熱の低下による Cm 添加量の増大という理由からによる。

また、Cm の添加量は崩壊熱に制限される為、崩壊熱を考慮しなくて良い U 燃料ならば、様々な濃縮度の燃料において、同様に燃焼度を高める効果が得られると考えられる。

高レベル放射性廃棄物である Cm を、燃料に添加して活用する手法を本研究では提案した。将来的に Cm を含む MA を利用する場合に、本研究の成果の応用が期待できる。

## 参考文献

- (1) Kawaguchi, K. et al , GLOBAL 2007 , Boise, (2007) p.290-295, in CD-ROM.
- (2) 木村礼, 吉田正 日本原子力学会秋の大会予稿集(CD-ROM) Vol.2008, C14
- (3) 木村礼, 吉田正 日本原子力学会春の年会予稿集(CD-ROM) Vol.2009, K03