

はじめに

原子力発電所から排出される放射性廃棄物→直接処分(2.6km², 100,000年*)、再処理(1.4km², 5,000年*)
 →階層型分離変換サイクル(0.41km², 300年*(300年後には0.015km²))
 階層型分離変換サイクル: 高レベル放射性廃棄物からマイナーアクチノイド(MA)を抽出し、
 加速器駆動システム(ADS)で核変換させることで、地層処分する放射性廃棄物の量を低減可能

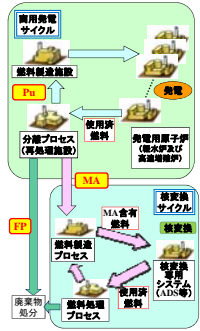


Figure 1. 階層型分離変換サイクル
 * ウランの放射性毒性を下回るまでに要する時間

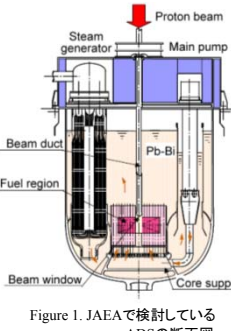


Figure 1. JAEAで検討しているADSの断面図

Reference 炉心の仕様¹⁾:

- 陽子ビーム: 1.5GeV
- 核破砕ターゲット: 鉛ビスマス(LBE)
- 冷却材: LBE
- 燃焼初期(BOC)のk_{eff}: 0.97
- 熱出力: 800MWth
- MA初期装荷量: 2.5t
- 燃料組成: (MA+Pu)N + ZrN
- 燃焼期間: 600EFPDs

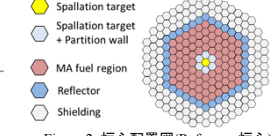


Figure 2. 炉心配置図(Reference炉心)

ADSで効率よく核変換するためには、
 運転期間中の熱出力を一定に保つことが重要

運転期間中の熱出力: 臨界性及びビーム電流値に依存
 → 臨界性が下がると、
 ビーム電流値を大きくすることで、熱出力を保持

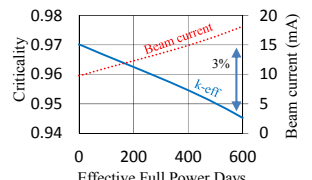


Figure 3. ADSの臨界性及びビーム電流値の時間推移例

ビーム電流値が大きくなると、ビーム窓への過剰な負荷

目的
 運転中の臨界性の変動を制御するために、
 未臨界度調整機構を導入したADSの概念を検討
 - 制御棒方式 (CR)
 - 可燃性毒物方式 (BP)

検討方法

- 燃焼解析による概念設計
 - 計算コード: ADS用三次元炉心解析コード ADS3D²⁾
 (汎用炉心解析システムMARBLE³⁾をベースに整備されたコード)
 - 核データライブラリ: JENDL-4.0 (70群断面面積セット)
- k_{eff}と陽子ビーム電流値について
 - Reference炉心との比較
 - 2-1 Reference vs CR case
 - 2-2 Reference vs BP case
 - 3. CR case 及び BP case の得失評価

制御棒導入ADSの概念設計

制御棒の材料: B₄C, Ta (集合体単位) → 2種類の制御棒で比較検討

Table 1: 制御棒の仕様

ケース名	B ₄ C	Ta
集合体数	3	3
装荷位置	第3領域	第2領域
全集合体のワース (<1.5%Δk/k)	1.66%	1.31%

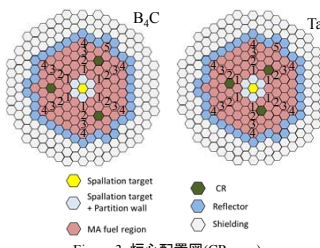


Figure 3. 炉心配置図(CR case)

Table 2: 燃料中のZr割合及びPu割合¹⁾

ケース名	Reference	B ₄ C	Ta
ZrN/(ZrN+PuN+MAN) ²⁾	0.388	0.322	0.331
PuN/(PuN+MAN) ²⁾	0.259	0.223	0.232

¹⁾ 燃焼初期のk_{eff}が0.97となるように調整。重量比

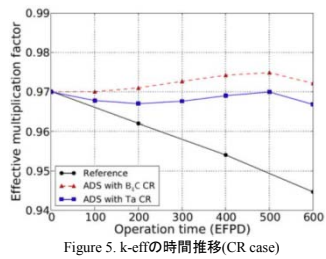


Figure 5. k_{eff}の時間推移(CR case)

Reference case:
 燃焼とともにk_{eff}が減少(燃焼末期: 0.945)
 CR cases:
 燃焼期間中、常にほぼ0.97
 本解析条件: 制御棒を一定間隔で引き抜き
 実際の運転: 制御棒位置の微調整が可能
 → ADSの運転では、燃焼期間中常にk_{eff}を0.97に調整することが可能

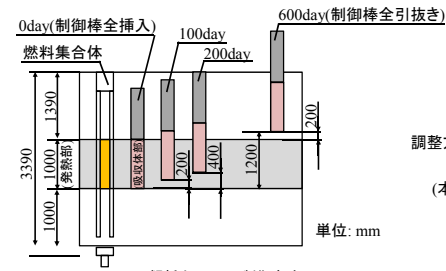


Figure 4. 解析上のCRの制御方法

調整方法: BOCでは全挿入、
 k_{eff}の低下に伴いCRの軸方向位置を調整
 (本研究では、200mm/100daysの
 一定間隔で引抜いた解析を実施)

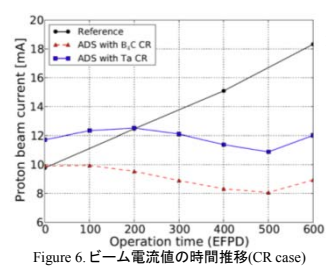


Figure 6. ビーム電流値の時間推移(CR case)

Reference case:
 燃焼初期では10mAであるのに対し、燃焼末期では18mAまで上昇
 CR cases:
 ビーム電流値の上昇を抑制(B₄C: 10mA以下、Ta: 13mA以下)
 → ビーム窓への負荷を緩和することが可能

B₄CとTaのビーム電流値の比較: B₄C < Ta
 → CRの装荷位置がTaの方が中性子源(核破砕ターゲット)に近いため

可燃性毒物導入ADSの概念設計

- BPの材料: Gd-Zr-H(ペレット)
- Hの含有量を変えて検討

Table 3: BP caseの解析条件

パラメータ	Case1	Case2	Case3
BP集合体の装荷数	6	<	<
BP集合体の装荷位置	第二領域	<	<
H/(Zr+Gd) ¹⁾	0.8	1	1.2
Gd/Zr ¹⁾	0.050	<	<
ZrN/(ZrN+PuN+MAN) ²⁾	0.314	0.308	0.302
PuN/(PuN+MAN) ²⁾	0.259	<	<

¹⁾ 原子数比、²⁾ 重量比、³⁾ 燃焼初期でk_{eff} = 0.97となるように調整

BP caseはCR caseよりも燃焼ステップを詳細化
 → k_{eff}に与える影響の大きいBPの燃焼を考慮する必要があるため

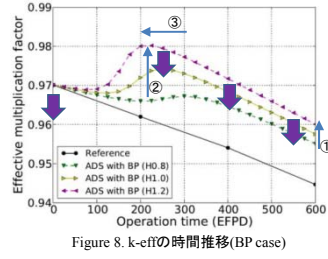


Figure 8. k_{eff}の時間推移(BP case)

BP cases:
 - k_{eff}がReference caseよりも0.97に近い
 → BPを装荷することで、reference caseよりも多く燃料を装荷することが可能
 (BPが、燃焼初期の余剰反応度を抑えるため)

仮にBP(H1.2) caseの条件が採用された場合

境界安全の観点より、燃焼初期のk_{eff}が0.96よりも小さい値となるよう再設計が必要

k_{eff}を小さくする分、ビーム電流値は悪化

- H含有量の差による比較
 H含有量が増えることで、
 - ① 燃焼初期と末期の間の燃焼反応度が減少
 - ② ピークが増大
 - ③ ピークの現れる燃焼ステップが、燃焼初期に近づく
 → H含有量が増えることで、炉内の中性子スペクトルが柔らくなるため、
 Gdで中性子捕獲反応率が大きくなる

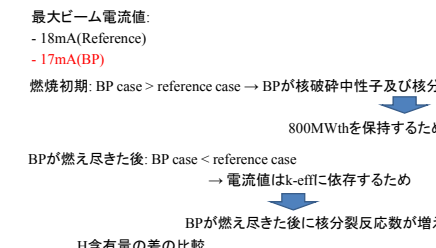


Figure 9. ビーム電流値の時間推移(BP case)

最大ビーム電流値:
 - 18mA(Reference)
 - 17mA(BP)
 燃焼初期: BP case > reference case → BPが核破砕中性子及び核分裂中性子を吸収するため
 800MWthを保持するために、核破砕ターゲットはより多くの中性子が生成が必要
 BPが燃え尽きた後: BP case < reference case
 → 電流値はk_{eff}に依存するため
 BPが燃え尽きた後に核分裂反応数が増え、k_{eff}が増加するため

H含有量の差の比較
 H含有量が増えるにつれ、BPが燃え尽きた後のビーム電流値は減少
 → H含有量が多いほど、より多くの燃料が装荷されているため

得失評価

Table 4: 得失評価結果

項目	ADS with CR	ADS with BP
運転中の臨界性	ほぼ0.97(微調整が可能)	Reference caseよりも0.97に近い
最大ビーム電流値	10 mA (B ₄ C), 13 mA (Ta)	17 mA
反応度の管理	調整操作による反応度挿入の考慮が必要	シンプル(装荷による過剰反応度の対応は必要)
付帯設備	追加の付帯設備が必要 例: CR駆動システム、CR交換システム、etc.	シンプル 燃料交換システムを流用可能
他の設備への影響	燃料交換方法に制限 ビームラインとの配置干渉	特になし
メンテナンス	CR駆動システムの定期点検が必要	特になし
開発試験	想定される開発試験が複数有	ほぼ省略可能

CR case
 メリット: ビーム電流値を大幅に削減することが可能
 デメリット: 課題が多い

BP case
 メリット: 未臨界度の制御がシンプル
 デメリット: 未臨界度の微調整に難有り

まとめ

ビーム窓への負荷を低減するために、CR及びBPによる未臨界度調整機構を有するADSの概念検討を行った。
 CR、BPのいずれの概念においてもそれぞれ課題はあるが、ビーム電流の最大値は、CRを用いた概念では10mA、BPを用いた概念では17mAとなり、Reference 炉心の18mAよりも小さくできるため、ビーム窓への負荷を低減できることが明らかとなった。
 従って、未臨界度調整機構を導入することで、階層型分離変換サイクルにおいて重要となるADSのビーム窓の設計条件を緩和できることを示した。