

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

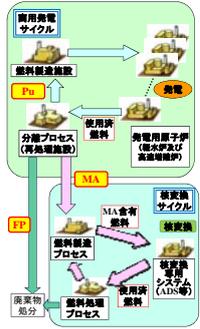


Figure 1. 階層型分離変換サイクル

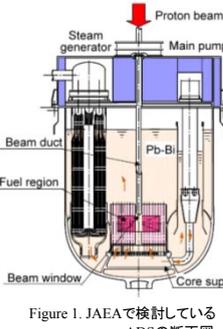


Figure 1. JAEAで検討しているADSの断面図

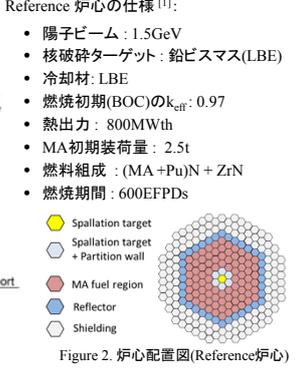


Figure 2. 炉心配置図(Reference炉心)

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

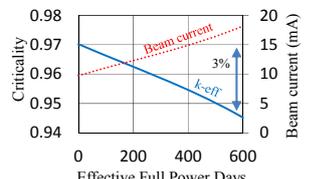


Figure 3. ADSの臨界性及びビーム電流値の時間推移例

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
1. 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 ADS3D^[2]
(汎用炉心解析システムMARBLE^[3]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)
2. 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%

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

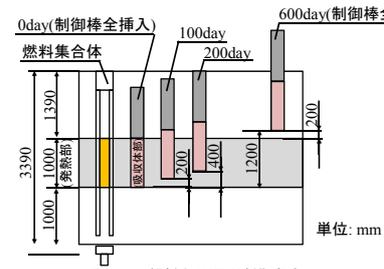


Figure 4. 解析上のCRの制御方法

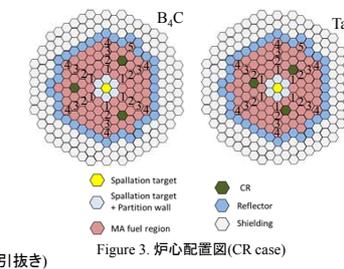


Figure 3. 炉心配置図(CR case)

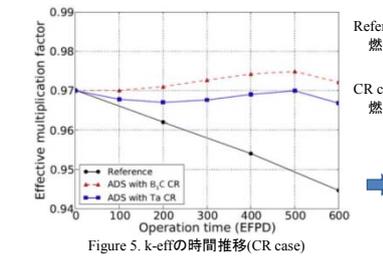


Figure 5. k-effの時間推移(CR case)

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

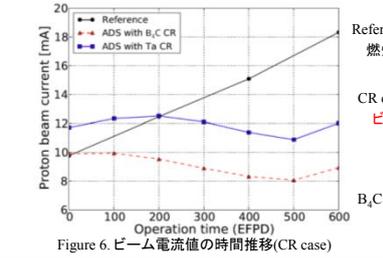


Figure 6. ビーム電流値の時間推移(CR case)

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

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	<	<

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

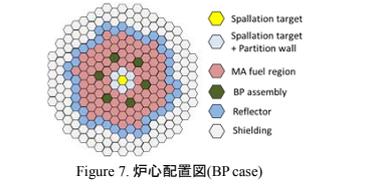


Figure 7. 炉心配置図(BP case)

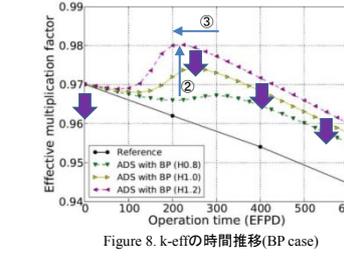


Figure 8. k-effの時間推移(BP case)

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)
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
→ BPが早く燃え尽きる

BP (H1.2) case: k-effのピークが0.98
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

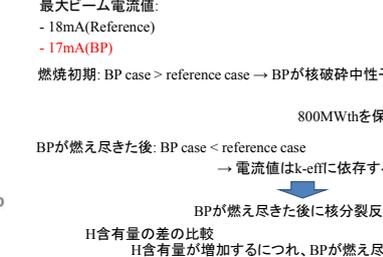


Figure 9. ビーム電流値の時間推移(BP case)

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)	17mA
反応度の管理	調整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BPI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よりも小さくなるため、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。

[1] K. Nishihara, et al. (2009), "Scientific design of accelerator-driven system of power sharing and beam current reduction", J. Nuclear Sci. Technol., 45 (8), pp. 812-822.
[2] T. Sugawara, et al. (2016), "Development of three-dimensional reactor analysis code system for accelerator-driven system, ADS3D and its application with subcriticality adjustment mechanism", J. Nuclear Sci. Technol., in press.
[3] K. Yokoyama, et al. (2014), "Development of comprehensive and versatile framework for reactor analysis, MARBLE", Annals of Nuclear Energy, 66, pp. 51-60.