JAEA-Research 2020-016 DOI:10.11484/jaea-research-2020-016



鉛ビスマス冷却型加速器駆動核変換システムにおける 酸素消費量の評価

Estimation of Oxygen Consumption Amount in LBE-cooled Accelerator-Driven System

菅原 隆德 小松 篤史 Takanori SUGAWARA and Atsushi KOMATSU

原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター 分離変換技術開発ディビジョン

Partitioning and Transmutation Technology Division Nuclear Science and Engineering Center Nuclear Science Research Institute Sector of Nuclear Science Research

KPS

January 2021

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2021

鉛ビスマス冷却型加速器駆動核変換システムにおける 酸素消費量の評価

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター 分離変換技術開発ディビジョン

菅原隆徳、小松篤史+

(2020年10月26日受理)

液体鉛ビスマス共晶合金(LBE)を用いた原子炉システムでは、酸素濃度を制御することによ り、LBE による鋼材腐食を防ぐ必要がある。本研究では、LBE 冷却型加速器駆動核変換システム (ADS) について、そのプラントで用いられる酸素消費量の評価を行った。評価は、実験に基づく 酸化皮膜厚さの評価式を用い、その厚さから酸素消費量を評価した。

その結果、燃料集合体の発熱部については、2 サイクルの炉内滞在で、最大で約 35 [µm] の酸化 皮膜が作られ、ビーム窓については、1 サイクルの運転で約 20 [µm] の酸化皮膜が作られること がわかった。これらの結果から求めたサイクルあたりの酸素消費量は、燃料集合体全体とビーム 窓それぞれで、25 [kg] と 0.3 [kg] となり、プラント全体としては約 30 [kg] となった。最終的な結 果として、JAEA-ADS では、定格運転時 3 - 4 [g/h]、ピーク時約 150 [g/h] の酸素を供給でき、1 サイクル(=1 年間)約 30 [kg]、40 年間で約 1200[kg] を供給できる酸素供給装置が必要となる。

原子力科学研究所:〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

+ 燃料・材料工学ディビジョン

Estimation of Oxygen Consumption Amount in LBE-cooled Accelerator-Driven System

Takanori SUGAWARA and Atsushi KOMATSU⁺

Partitioning and Transmutation Technology Division Nuclear Science and Engineering Center Nuclear Science Research Institute Sector of Nuclear Science Research Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 26, 2020)

It is required to control the oxygen concentration in lead-bismuth eutectic (LBE) to prevent the corrosion of steels in LBE-cooled nuclear system. This study estimated the oxygen consumption amount in the LBE-cooled accelerator-driven system (ADS). We used the evaluation formula for the oxide layer thickness, which were derived by various experiments, to estimate the oxygen consumption amount.

It was found that the maximum oxide layer thicknesses for the fuel assembly and the beam window were about 35 $[\mu m]$ and 20 $[\mu m]$, respectively. Based on these results, the oxygen consumption amount for the ADS plant was estimated as 30 [kg] during one cycle (one year). Through this study, it was indicated that an oxygen supply device which could supply 3 - 4 [g/h] oxygen in the normal operation, 150 [g/h] in the peak and about 30 [kg] during one cycle was necessary.

Keywords: Accelerator-Driven System (ADS), Lead-Bismuth Eutectic (LBE), Oxygen consumption amount, Oxide layer thickness

⁺ Fuels and Materials Engineering Division

1. 緒言	 •	 1
2. 条件設定		 2
2.1 JAEA-ADS の諸元		 2
2.2 運転シナリオ	 •	 8
3. 酸素消費量の定式化		 10
3.1 基礎式について		 10
3.2 基礎式の妥当性検討		 11
3.3 酸素消費量の定式化	 •	 17
4. 結果と考察		 28
4.1 基礎式に基づく結果		 28
4.2 感度解析	 •	 30
5. 結言	 •	 37
謝辞	 •	 38
参考文献	 •	 39
付録 A ビスマスの資源量について		 41
A.1 はじめに		 41
A.2 資源量の調査		 41
A.3 評価と考察		 42
A.4 まとめ		 44
A.5 参考文献		 44

Contents

1. Ir	troduction	1
2. C	ondition setting	2
2.1	Main parameters of JAEA-ADS	2
2.2	Operation scenario	8
3. F	ormulation of oxygen consumption amount	10
3.1	Basic fomula	10
3.2	Validation of basic fomula	11
3.3	Formulation	17
4. R	esults and discussion	28
4.1	Results based on basic fomula	28
4.2	Sensitivity analysis	30
5. C	onclusion	37
Ackno	wledgment	38
Refere	nces	39
Apper	dix A Bismuth resource	41
A.1	Introduction	41
A.2	Investigation for bismuth resource	41
A.3	Evaluation and discussion	42
A.4	Conclusion	44
A.5	References	44

List of Tables

Table 2.1.1	ADS プラントの主なパラメータ	2
Table 2.1.2	ADS 炉心の主なパラメータ	4
Table 2.1.3	構成機器の LBE に接触する表面積................	7
Table 2.2.1	起動・停止時の時間..........................	8
TT 11 401	咸 安 初 七 の と の 乳 ウ	0.0
Table 4.2.1	感	33
Table $4.2.2$	感度解析の主要な結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	33
Table $4.2.3$	各ケースの酸素消費率	33
Table A.3.1	ADS1 基あたりに必要な冷却材費用(単位:百万円)	43

List of Figures

Fig. 2.1.1	ADS プラントの立面図(単位: mm)	3
Fig. 2.1.2	ADS プラントの平面図	3
Fig. 2.1.3	燃料集合体組立図 (単位: mm)	5
Fig. 2.1.4	燃料集合体平面図 (単位: mm)	6
Fig. 2.1.5	燃料ピン組立図 (単位: mm)	6
Fig. 2.2.1	ADS 起動時の時間と定格出力の関係	9
Fig. 2.2.2	ADS 停止時の時間と定格出力の関係	9
Fig. 3.1.1	基礎式の酸化皮膜量...........................	11
Fig. 3.2.1	450 [°C] における T91 鋼の腐食量の時間依存性	13
Fig. 3.2.2	470 [°C] における T91 鋼の腐食量の時間依存性	13
Fig. 3.2.3	500 [°C] における T91 鋼の腐食量の時間依存性	14
Fig. 3.2.4	550 [°C] における T91 鋼の腐食量の時間依存性	14
Fig. 3.2.5	600 [°C] における T91 鋼の腐食量の時間依存性	15
Fig. 3.2.6	1 年経過時の推定腐食量のアレニウスプロット	15
Fig. 3.2.7	基礎式と小松の式による酸化皮膜量の比較	16
Fig. 3.3.1	Δt_{400} の説明	20
Fig. 3.3.2	燃料交換時の FA 数と時間の関係(第1サイクル終了後)	24
Fig. 3.3.3	燃料交換時の FA 数と時間の関係(第 2 サイクル以降)	27
Fig. 4.1.1	各構成機器の酸化皮膜量(第2サイクルまで)........	29

Fig. 4.1.2	各構成機器の酸素消費量(第2サイクルまで)........	29
Fig. 4.1.3	JAEA-ADS の酸素消費量(40 年間)	30
Fig. 4.2.1	燃料集合体の酸化皮膜量(第2サイクルまで)........	34
Fig. 4.2.2	ビーム窓の酸化皮膜量(第2サイクルまで)	34
Fig. 4.2.3	その他構成機器の酸化皮膜量(第2サイクルまで)	35
Fig. 4.2.4	低温概念における酸素消費量(第2サイクルまで)	35
Fig. 4.2.5	高温概念における酸素消費量(第2サイクルまで)	36
Fig. 4.2.6	各概念の酸素消費量(40 年間)	36
Fig. A.2.1	鉱山におけるビスマスの生産量	41
Fig. A.2.2	ビスマスの埋蔵量.............................	42
Fig. A.3.1	ビスマスの価格の推移	43

緒言 1.

日本原子力研究開発機構(JAEA)では、使用済み核燃料中の高レベル放射性廃棄物(HLW: High Level Waste)から分離されるマイナーアクチノイド(MA: Minor Actinide)の核変換を目 的として、加速器駆動核変換システム(ADS: Accelerator-Driven System)の研究開発を行って いる¹⁻³⁾。JAEA で検討している ADS は、核破砕ターゲットおよび冷却材として液体鉛ビスマス 共晶合金(LBE: Lead Bismuth Eutectic)を用いることを想定している。LBE は、中性子の減速 能が低く、熱伝導に優れていることから、高速中性子を利用する核変換システムの冷却材として 有望である。一方で、鋼材に対する腐食は無視できず、特に燃料被覆管やビーム窓等の薄肉体材 料との共存性が大きな課題となっている。

LBE による材料腐食については、LBE 中の酸素濃度を適切な値に制御することで、腐食を防止できることが知られている⁴⁾。これは鋼材の表面に酸化皮膜を作ることにより、LBE による腐食を防ぐものである。すなわち、ADS 構成機器の健全性を保つためには、ADS プラントに適切な量の酸素を供給し、鋼材の酸化皮膜を保つことが必要となる。

LBE 中の酸化皮膜に関する研究は、主に欧州を中心に進められてきた。文献⁵⁾は、欧州で実施 された LBE および鉛ループを用いた腐食試験の結果をもとに、T91 鋼および AISI316L の腐食量 を定式化した。またこの式を用いて、欧州で検討が行われた ADS 概念 EFIT を対象とし、EFIT の運転に必要となる酸素量を評価した。

本研究では、JAEA-ADS の運転停止に関する流れを明確化し、文献⁵⁾の内容を基にして、プ ラントとして必要となる酸素量の評価を行う。必要な酸素量の評価は、今後、酸素供給装置を設 計する上で必須の情報となる。また、各構成機器の酸化皮膜量をあわせて評価することになるた め、例えば燃料被覆管やビーム窓の酸化皮膜量を評価し、それを熱流動解析に反映させることで、 酸化皮膜生成による熱伝導悪化の影響を評価することが可能となる。

第2章では、プラントの諸元や運転シナリオなど、評価における条件を提示する。第3章では、 文献⁵⁾に基づいて、JAEA-ADSを対象とした酸素消費量の定式化を行う。第4章では、評価結 果を示すとともに、酸素消費量の基礎式を変えた場合の感度解析の結果を示す。また評価結果に 対する考察を行い、第5章を結言とする。

2. 条件設定

2.1 JAEA-ADSの諸元

2.1.1 ADS プラント

ADS プラントに関する情報は、文献⁶⁾ に基づく¹。基本的な情報を **Table 2.1.1** に示す。熱出 力は 800 [MW] であり、1.5 [GeV] の陽子ビームにより運転する。1 サイクル 300 EFPDs の運転 により、約 250 [kg] の MA を核変換することが可能である。通常運転時の冷却材入口温度は 300 [°C] とし、流速のノミナル値は 2.0 [m/s] としている。

Fig. 2.1.1と **Fig. 2.1.2**に、ADS プラントの立面図と平面図を示す。原子炉容器内には、炉 心、ビームダクト、主循環ポンプ2基、蒸気発生器(SG)4基が存在する。炉心で温められた LBE が高温部へ流れ、SG に入り、除熱されて低温部へ移動する。低温部の LBE はポンプにより炉心 下部に送り出され、炉心の除熱を行う。なお **Fig. 2.1.2**には、酸素濃度制御装置のポートも用意 されているが、装置自体が具体化されていないため、今回の評価では扱わない。

100		
プラント	熱出力	800 [MW]
	冷却材	LBE
	冷温停止時冷却材温度	$200 \ [^{\circ}C]$
	冷却材入口温度(定格運転時)	$300 \ [^{\circ}C]$
	冷却材流速	$2.0 [{ m m/s}]$
	実効増倍率	0.98
	1サイクル	300 EFPDs^*
	燃料集合体炉内滞在時間	$600 \ \mathrm{EFPDs}$
	核変換量	$250 \ \mathrm{kgMA/cycle}$
加速器	タイプ	超伝導線形加速器
	陽子ビームエネルギー	$1.5 \; [\mathrm{GeV}]$
	最大陽子ビーム電流値	15 [mA]

Table 2.1.1 ADS プラントの主なパラメータ

*: Effective Full Power Days

2.1.2 ADS 炉心

ADS 炉心の主要なパラメータを **Table 2.1.2** にまとめる。炉心については、文献²⁾ の情報に 基づくが、燃料集合体内の LBE 流動解析の結果を基に、ピンピッチを 11.48 から 11.78 [mm] に 変更している。燃料集合体(FA)はダクトレス集合体であり、炉心に 276 体装荷される。FA あ

¹実効増倍率と最大陽子ビーム電流値は、文献²⁾に基づく。



Fig. 2.1.1 ADS プラントの立面図(単位: mm)



Fig. 2.1.2 ADS プラントの平面図

たりの燃料ピン数は121本であり、ダクトレス集合体のため、6本のタイロッドと6つのグリッド スペーサにより固定される(Fig. 2.1.3、Fig. 2.1.4)。燃料ピンはFig. 2.1.5に示すとおり、 中心の1000 [mm] に燃料ペレットがあり発熱する。その上下を上部、下部と呼ぶ。

Table 2.1.2 ADS 炉心の主なパラメータ			
燃料集合体(FA)	タイプ	六角形ダクトレス	
	FA 数	276	
	ピッチ	$134.5 \; [mm]$	
	幅	$133.5 \; [mm]$	
FA	あたりの燃料ピン数	121	
\mathbf{FA}	あたりのタイロッド数	6	
FA あた	こりのグリッドスペーサ数	6	
	被覆管材料	T91 鋼	
	ピン外径 (D)	$7.65 \; [mm]$	
	ピン内径	$6.65 \; [\mathrm{mm}]$	
	ピンピッチ (P)	$11.78 \; [mm]$	
	P/D	1.54	
	全体の長さ	$2930~[\mathrm{mm}]$	
燃	料部(発熱部)長さ	1000 [mm]	

2.1.3 主要機器の表面積

次章に示すように、必要となる酸素量を評価するには、各構成機器の LBE に接触する部分の 表面積が必要となる。これらの表面積は基本的に Fig. 2.1.1 の CAD 図面をベースに評価した。 ただし炉心内については、Table 2.1.2 および Fig. 2.1.3 を基に評価した。評価結果を Table 2.1.3 にまとめる。なお、表中の上部、下部の位置関係は、Fig. 2.1.5 に基づく。

評価の結果、LBE に接触する部分の面積は全体で 7687.8 [m²] となった。一方、EFIT の構成機 器の表面積は全体で 7475.6 [m²] であった⁵⁾。出力規模が異なるものの、合計値はほぼ同じくらい の値となっており、妥当な評価になっていると考えられる。



Fig. 2.1.3 燃料集合体組立図 (単位: mm)



Fig. 2.1.4 燃料集合体平面図 (単位: mm)



Fig. 2.1.5 燃料ピン組立図 (単位: mm)

Table 2.1.3 構成機器の LBE に接触する表面積

	機器	温度 [°C]*1	面積 [m ²]
$S_{1,1}$	FA 上部	400	1028.2
$S_{1,2}$	反射体上部	400	145.7
$S_{1,3}$	ポンプ・SG 高温部	400	664.9
$S_{1,4}$	炉容器・ビームダクト高温部、内筒	400	248.5
$S_{2,1}$	燃料ピン発熱部	300-550	802.6
$S_{2,2}$	発熱部のタイロッド、スペーサ	300-400	180.6
$S_{2,3}$	反射体、炉心槽	300-400	228.2
$S_{2,4}$	ビームダクト	300-480	9.8
$S_{3,1}$	FA下部	300	881.0
$S_{3,2}$	反射体下部	300	122.1
$S_{3,3}$	ポンプ低温部	300	264.9
$S_{3,4}$	炉容器低温部	300	687.4
S_4	SG	300-400	2424.0
Total			7687.8

*1: 温度は目安。

2.2 運転シナリオ

ADS の起動・停止シナリオを **Fig. 2.2.1** と **Fig. 2.2.2** に示す。また、各内容の詳細を **Table 2.2.1** に示す。ここに、BW はビーム窓(Beam Window)、FA は燃料集合体 (Fuel Assembly) を 意味する。

ADS 建設後、LBE を炉容器内に入れ、まず 1000 時間の初期調整を行い、FA 以外の機器に酸 化皮膜を作る。その後、10 [h/FA] のペースを目安として、FA を装荷する。FA 装荷後、5 日程度 をかけて BW を装荷し、原子炉を起動する。現在の設計では、最初加速器をパルス運転し、原子 炉出力を 20%まで上げた時点で、運転モードをパルスから CW(連続ビーム)に切り替える。そ の後、CW 運転のまま出力を 100%まで徐々に上げていく。

300 EFPDs (Effective Full Power Days)の定格運転後、起動と逆の操作により、運転を停止す る。運転停止後は、BW を取出し、燃料交換を行う。現在の設計では、1 サイクル(300 EFPDs) 毎に半分の FA を取出し、新しい燃料に置き換える。この取り出し、装荷の作業についても約 10 [h/FA] のペースで行う。燃料交換後、新しい BW を装荷し、次のサイクルの運転を開始する。

Cycle	項目	変数	時間 [h]	温度 * ¹ [°C]	備考
	初期調整	t_1	1000	200	文献 ⁵⁾ 参考
	燃料装荷	$t_2 - t_1 - \Delta t_{BW,in}$	3000	200	10 [h/FA] を目安
					(文献 ⁷⁾ を参考)
	BW 装荷	$\Delta t_{BW\!,in}$	120	200	5日(仮置)
1	起動(0-20%)	$t_{3a} - t_2$	1	264	
	起動(20%)	$t_{3b} - t_{3a}$	3	300	パルス-CW 切替
	起動(20-100%)	$t_{3c} - t_{3b}$	5	400	
	定格運転	$t_4 - t_{3c}$	7200	400	$300 \ \mathrm{EFPDs}$
	停止(100-20%)	$t_{5a} - t_4$	5	400	
	停止(20%)	$t_{5b} - t_{5a}$	3	300	CW-パルス切替
	停止(20-0%)	$t_{5c} - t_{5b}$	1	200	
	BW 取出	$\Delta t_{BW,out}$	120	200	5日
	燃料交換	$t_6 - t_{5c} - \Delta t_{BW,out} - \Delta t_{BW,in}$	1320	200	10 [h/FA] を目安
	BW 装荷	$\Delta t_{BW\!,in}$	120	200	5日
2	起動(0-20%)	$t_{3a} - t_2$	1	264	
	以下繰り返し				

Table 2.2.1 起動・停止時の時間

*1:代表温度として炉心出口温度を示す。

*2: 起動・停止は文献⁸⁾に基づく。



Fig. 2.2.1 ADS 起動時の時間と定格出力の関係



Fig. 2.2.2 ADS 停止時の時間と定格出力の関係

3. 酸素消費量の定式化

ここでは、文献⁵⁾ で用いられている LBE 中の酸素消費量の式(以下、基礎式とする)を紹介 し、その妥当性を検討する。そして、基礎式をもとに、JAEA で検討している ADS を評価するた めの定式化を行う。

3.1 基礎式について

文献 ⁵⁾ では、腐食試験の結果をもとに、T91 鋼にできる酸化皮膜の厚さ $\delta(t,T)$ [μ m] を、時間 t [h] と温度 T [°C] の関数として、次のように表現している。

$$\delta(t,T) = (-0.987 + 2.54 \times 10^{-3}T)\sqrt{t}, \qquad (3.1)$$

この式は LBE 中の酸素濃度が 10^{-6} [wt%] 、温度範囲が 420-550 [°C] を前提としている。この酸 化皮膜の量から、消費される酸素量 W(t,T) [g] は次式で求められる。

$$W(t,T) = 4 \times 10^{-4} \delta(t,T) S \rho \frac{M_O}{M_{Fe_3O_4}},$$
(3.2)

ここに、S は対象とする構造物の表面積 [cm²]、 ρ は酸化皮膜の密度(=5.2 [g/cm³])、 M_O は酸素の原子量(=16 [g])、 $M_{Fe_3O_4}$ は酸化鉄の分子量(=231.52 [g])である。

記述を簡略化するため、式 (3.1) を

$$\delta(t,T) = F(T)\sqrt{t},\tag{3.3}$$

とする。ここに

$$F(T) = (-0.987 + 2.54 \times 10^{-3}T), \tag{3.4}$$

である。また式 (3.2) に値を代入し、便宜上、S の単位を [m²] で扱うため、

$$W(t,T) = 1.44S\delta(t,T),$$
 (3.5)

として扱う (ここに $\delta(t,T)$ の単位は [μ m])。

基礎式の酸化皮膜量 $\delta(t,T)$ をプロットしたものを、**Fig. 3.1.1** に示す。40 年間 T91 鋼を LBE に浸漬し、酸素濃度を 10⁻⁶ [wt%] に保った場合、最大で 250 [μ m] の酸化皮膜が生成されるという評価となった。この式の適用範囲は 420-550 [°C] となっているが、この図から 400 [°C] まで外挿することは可能と判断した²。よって本検討では、基礎式を 400[°C] 以上に適用できると仮定して検討を進める。

²これより低い温度を扱うと、値が負となった。



Fig. 3.1.1 基礎式の酸化皮膜量

3.2 基礎式の妥当性検討

ここでは T91 鋼の LBE 中における腐食予測式を、文献調査および追加試験 ⁹⁾ により求め、基礎式と比較し、妥当性を検討する。実機環境を想定すると、運転開始時は LBE 中には酸素が飽和しており、その後の酸素濃度調整により、適切とされる $10^{-7} - 10^{-5}$ wt.%に保たれると考えられる。そのため試験条件として、酸素濃度が 10^{-7} wt.%以上における腐食試験結果を用いて腐食量の予測を試みた。腐食量を表す指標としては、酸化皮膜厚さおよび最大腐食深さを用いた。Fig. 3.2.1 - Fig. 3.2.5 はそれぞれ 450 [°C]、470 [°C]、500 [°C]、550 [°C]、600 [°C] において測定された腐食量を、時間に対して両対数プロットしたものである 9-20)。いずれの図においても時間経過とともに腐食量が増加する傾向にある。

図中の式は、腐食量の時間変化を以下の式で近似したものである。

$$d = At_h^B, \tag{3.6}$$

ここに *d* は腐食量 [µm]、*t_h* は経過時間 [hour] である。ただし 450 [°C] における、腐食量が非常 に大きい一点は、酸化皮膜がほとんど無い状態で局所的に腐食しており、その他と状況が異なっ ていると判断したため、近似式の算出からは除外した。

得られた近似式 B の部分に着目すると、腐食速度が時間とともにどう変化していくのかがわか る。B が 1 であれば腐食速度が時間に対して変化しないことを表しており、B が 1 より小さけれ ば腐食速度が時間とともに低下することを表している。また、B の値が 0.5 の場合は放物線則と いわれ、腐食速度が酸化皮膜中の拡散に支配されている場合に見られる。得られた近似式の B の 値は 0.437-0.656 であり、比較的 0.5 に近い。そのため、これらの条件における T91 の腐食は、お おむね酸化皮膜中の拡散に支配されていると考えられ、長期の平均的な腐食量を予測する場合は 放物線則を用いるのが適切だと考えられる。ただし、局所的に大きく腐食する場合があるので、 局部腐食を防止する方策が必要と思われる。

長期の腐食予測式を求めるにあたり、まずは1年経過時の腐食量の温度依存性を求める。Fig. 3.2.6 は各温度における近似式から算出した、1年経過時の腐食量のアレニウスプロットである。 Fig. 3.2.6 より、1年経過時の腐食量は以下の式で表される。

$$d = 3.869 \times 10^7 exp\left(\frac{-10720}{T}\right), \tag{3.7}$$

ここに T は絶対温度 [K] である。さらに放物線則を仮定することで、T91 鋼の LBE 中における 腐食予測式として以下の式が求まる。

$$d = 3.869 \times 10^7 exp\left(\frac{-10720}{T}\right) \times t_y^{0.5},\tag{3.8}$$

ここに t_u は経過時間 [year] である。この式をこれ以降、小松の式と呼ぶ。

基礎式 (3.1) と小松の式 (3.8) を比較すると、時間依存性についてはどちらも放物線則となっ ており、扱いは妥当である。温度依存性については、基礎式は線形、小松の式は指数関数で記述 されている。代表的な温度における酸化皮膜量を比較した結果を、Fig. 3.2.7 に示す。基礎式は 酸素濃度 10⁻⁶ wt.%、小松の式は 10⁻⁷ wt.%以上を前提に評価しているが、450 [°C] における評 価値はよく一致している。しかしながら、温度が高くなるにつれ、基礎式の方が過小評価する結 果が示された。500 [°C] の場合は 28%、550 [°C] の場合は 55%、酸化皮膜量を過小評価する。以 上から、基礎式の時間依存性の評価は妥当であるが、500 [°C] を超える高温時の温度依存性の扱 いは、酸化皮膜量を過小評価している可能性があり、注意を要する。



Fig. 3.2.1 450 [°C] における T91 鋼の腐食量の時間依存性



Fig. 3.2.2 470 [°C] における T91 鋼の腐食量の時間依存性



Fig. 3.2.3 500 [°C] における T91 鋼の腐食量の時間依存性



Fig. 3.2.4 550 [°C] における T91 鋼の腐食量の時間依存性



Fig. 3.2.5 600 [°C] における T91 鋼の腐食量の時間依存性



Fig. 3.2.6 1 年経過時の推定腐食量のアレニウスプロット



Fig. 3.2.7 基礎式と小松の式による酸化皮膜量の比較

3.3 酸素消費量の定式化

基礎式をベースとして、第2章で設定した各運転状態の酸化皮膜量および酸素消費量を定式化 する。3.1節で議論したとおり、基礎式は420-550 [°C] を対象としているが、本検討では400 [°C] 以上に適用できると仮定する。また400 [°C] 以下についても、400 [°C] と同じ量の酸化皮膜が生 成すると仮定する。

3.3.1 初期調整

初期調整期間中の酸素消費量 W₁ および酸化皮膜量 δ₁ は³、以下の式で求められる。

$$W_1 = 1.44(S_{all} - S_{FA} - S_{BW})\delta_1, (3.9)$$

$$\delta_1 = F(T_1)\sqrt{t}.\tag{3.10}$$

S_{all}、<i>S_{FA}、S_{BW} はそれぞれ、全体の表面積、全燃料集合体の表面積そして BW の表面積である。 *T*₁ は実際には 200 [°C] であるが、今回の評価では 400 [°C] を用いている。

3.3.2 燃料装荷

燃料装荷時の酸素消費量 W2 は次式で求められる。

$$W_2 = W_1 + dW_2, (3.11)$$

ここに dW₂は、燃料装荷時の酸素消費量の増加分であり、

$$dW_2 = dW_{FA} + dW_{BW} + dW_{others}.$$
(3.12)

ここに dW_{FA} と dW_{BW} は、FA と BW における増加量、 dW_{others} はそれ以外の機器における増加量である。

それぞれの増加量は、以下の式から求められる。

$$dW_{FA} = 1.44 \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} S_{FA} \Delta \delta_{2,FA}, \qquad (3.13)$$

$$dW_{BW} = 1.44S_{BW}\Delta\delta_{2,BW},\tag{3.14}$$

$$dW_{others} = 1.44(S_{all} - S_{BW} - S_{FA})\Delta\delta_{2,others}.$$
(3.15)

ただし、 t_1, t_2 については、**Fig. 2.2.1** および **Table 2.2.1** を参照のこと。 $\Delta \delta_{2,FA}$ 、 $\Delta \delta_{2,BW}$ そして $\Delta \delta_{2,others}$ は、以下の式から求められる。

$$\Delta\delta_{2,FA} = F(T_2)\sqrt{t - t_1},\tag{3.16}$$

$$\Delta \delta_{2,BW} = F(T_2) \sqrt{t - (t_2 - \Delta t_{BW,in})}, \qquad (3.17)$$

$$\Delta \delta_{2,others} = F(T_2)\sqrt{t - \Delta \delta_{1,others}}.$$
(3.18)

T₂は200 [°C] であるが、今回の評価では400 [°C] を用いている。

³以降、(t,T)の表記は省略する

3.3.3 起動(第1サイクル)

3.3.3.1 出力 0-20%

起動時の出力 0-20%変化時における酸素消費量 W_{3a} は次式で求められる。

$$W_{3a} = W_2 + dW_{3a}, (3.19)$$

ここに dW_{3a} は、この時の酸素消費量の増加分である。

第1サイクルでは、*dW*_{3a}は次式で表される、

$$dW_{3a} = dW_{3a,FA} + dW_{3a,BW} + dW_{3a,others}.$$
(3.20)

ここに $dW_{3a,FA}$ と $dW_{3a,BW}$ は、FA と BW における増加量、 $dW_{3a,others}$ はそれ以外の機器における増加量である⁴。

それぞれの増加量は、以下の式から求められる。

$$dW_{3a,FA} = 1.44S_{FA}\Delta\delta_{3a,FA},\tag{3.21}$$

$$dW_{3a,BW} = 1.44S_{BW}\Delta\delta_{3a,BW},\tag{3.22}$$

$$dW_{3a,others} = 1.44(S_{all} - S_{BW} - S_{FA})\Delta\delta_{3a,others}.$$
(3.23)

 $\Delta \delta_{3a,FA}$ 、 $\Delta \delta_{3a,BW}$ そして $\Delta \delta_{3a,others}$ は、以下の式から求められる。

$$\Delta \delta_{3a,FA} = F(T_3)\sqrt{t - t_1} - \Delta \delta_{2,FA}, \qquad (3.24)$$

$$\Delta\delta_{3a,BW} = F(T_3)\sqrt{t - (t_2 - \Delta t_{BW,in})} - \Delta\delta_{2,BW},\tag{3.25}$$

$$\Delta \delta_{3a,others} = F(T_3)\sqrt{t - \Delta \delta_{2,others}}.$$
(3.26)

*T*₃ は出力に応じて変化するが、この段階では *T*₃ < 400 [°C] のため、今回の評価では 400 [°C] を 用いている。

3.3.3.2 出力 20%保持

今回の評価では、出力 20%の場合、すべての機器の温度は 400 [°C] 以下のため、「出力 0-20%」の式を適用する。

⁴以下、添字が変わるだけで、それぞれの意味は変わらないので、説明を省略する。

3.3.3.3 出力 20-100%

起動時の出力 20-100%変化時における酸素消費量 W_{3c} は次式で求められる。

$$W_{3c} = W_{3a} + dW_{3c}, (3.27)$$

ここに dW_{3c}は、この時の酸素消費量の増加分である。

本検討では、出力と温度は単純に比例すると仮定し、出力 100%で各要素の最高温度に達するものとする。起動時の燃料ピンの最高温度は 500 [°C]、BW の最高温度は 480 [°C] とする。温度が 400 [°C] を超えるのは FA と BW である。よって FA と BW 以外の機器については、「出力 0-20%」の式を適用する。また、FA と BW についても、400 [°C] 以下の場合には、「出力 0-20%」の式を 適用する。以下の議論は 400 [°C] を超えた時のものである。

第1サイクルでは、*dW*3c は次式で表される、

$$dW_{3c} = dW_{3c,FA1} + dW_{3c,FA2} + dW_{3c,BW} + dW_{3c,others}.$$
(3.28)

ここに FA1 は、燃料集合体のうち燃料被覆管を意味し、FA2 は燃料集合体のうち、FA1 以外の部 分(グリッドスペーサー、タイロッド等)を指す。すなわち、

$$S_{FA} = S_{FA1} + S_{FA2}, (3.29)$$

となる。燃料被覆管は定格運転時に 500 [°C] を超える一方で、FA のその他の要素は 400 [°C] 程度になるため、酸素皮膜量が異なることから、分けて考えている。

それぞれの酸素消費量の増加分は、

$$dW_{3c,FA1} = 1.44S_{FA1}\Delta\delta_{3c,FA1},\tag{3.30}$$

$$dW_{3c,FA2} = 1.44S_{FA2}\Delta\delta_{3c,FA2},\tag{3.31}$$

となる。また、酸化皮膜量は、

$$\Delta \delta_{3c,FA1} = \int_{0}^{x_2 - x_1} \left\{ -0.987 + 2.54 \times 10^{-3} \left(T_{in} - \frac{T_{in} - T_{clad}}{x_2 - x_1} \right) x \right\} dx \sqrt{t - (t_{3b} + \Delta t_{3,400})} - \Delta \delta_{3a,FA1}$$

$$(3.32)$$

$$\Delta \delta_{3c,FA2} = F(T_3') \sqrt{t - (t_{3b} + \Delta t_{3,400})} - \Delta \delta_{3a,FA2}, \qquad (3.33)$$

ここに x_1 は炉心下部の位置、 x_2 は炉心上部の位置であり、それぞれ 0.0, 1.0 [m] である。 T_{in} は 炉心入口温度、 T'_3 は出力に応じて 300-400 [°C] で変化するが、今回の評価ではどちらも 400 [°C] としている。 T_{clad} は被覆管表面温度、 $\Delta t_{3,400}$ は、 t_{3b} 以降、被覆管表面温度が 400 [°C] に達する 時間である(**Fig. 3.3.1**)。被覆管表面温度は、出力 P [%] と比例関係にあると仮定していること から、次式で表現できる、

$$T_{clad} = 3P + 200, (3.34)$$

ここから、式(3.32)は次式となる、

$$\Delta \delta_{3c,FA1} = (-0.2405 + 3.795 \times 10^{-3} P) \sqrt{t - (t_{3b} + \Delta t_{3,400}) - \Delta \delta_{3a,FA1}}.$$
 (3.35)

次に BW について議論する。被覆管に関しては高さ方向の温度分布を考慮したが、BW については、窓からダクトまで LBE に触れる全体に対し一様の温度を仮定する。このとき BW の酸素 消費量の増加分は、

$$dW_{3c,BW} = 1.44S_{BW}\Delta\delta_{3c,BW},\tag{3.36}$$

となり、酸化皮膜の増加量は、

$$\Delta\delta_{3c,BW} = (-0.987 + 2.54 \times 10^{-3} T_{BW}) \sqrt{t - (t_{3b} + \Delta t_{3,400}^{BW})} - \Delta\delta_{3a,BW}, \qquad (3.37)$$

となる。ここに $\Delta t^{BW}_{3,400}$ は、 t_{3b} 以降、BW 温度が 400 [°C] に達する時間であり、 $\Delta t_{3,400}$ と同じ考 え方である。 T_{BW} は BW の温度であり、出力 *P* と比例関係にあると仮定すると、

$$T_{BW} = 2.8P + 200, \tag{3.38}$$

になる。よって式(3.37)は、

$$\Delta\delta_{3c,BW} = (-0.479 + 7.112 \times 10^{-3} P)\sqrt{t - (t_{3b} + \Delta t_{3,400}^{BW})} - \Delta\delta_{3a,BW}.$$
 (3.39)



Fig. 3.3.1 Δt_{400} の説明

3.3.4 定格運転(第1サイクル)

定格運転における酸素消費量W4は次式で求められる。

$$W_4 = W_{3c} + dW_4, (3.40)$$

 dW_4 は、

$$dW_4 = dW_{4,FA1} + dW_{4,FA2} + dW_{4,BW} + dW_{4,others},$$
(3.41)

と表される。それぞれの酸素消費量の増加分は、

$$dW_{4,FA1} = 1.44S_{FA1}\Delta\delta_{4,FA1},\tag{3.42}$$

$$dW_{4,FA2} = 1.44S_{FA2}\Delta\delta_{4,FA2},\tag{3.43}$$

$$dW_{4,BW} = 1.44S_{BW}\Delta\delta_{4,BW},\tag{3.44}$$

このうち燃料被覆管に関しては、定格運転中に未臨界度が深くなり、ピーキング係数が悪化することによって、被覆管温度が上昇する。文献²⁾の評価では、燃焼サイクル期間中、被覆管最高温度は500-520 [°C]の間で推移する。よって、7200 [h]の間に被覆管最高温度が500から520 [°C]に変化すると仮定して、その効果を考慮した。この時の燃料被覆管における酸素皮膜の増加分 $\Delta \delta_{4,FA1}$ は、次のように書くことができる、

$$\Delta\delta_{4,FA1} = \int_0^{x_2 - x_1} \left\{ -0.987 + 2.54 \times 10^{-3} \left(T_{in} - \frac{T_{in} - T'_{clad}}{x_2 - x_1} \right) x \right\} dx \sqrt{t - t_{3c}} - \Delta\delta_{3c,FA1}.$$
(3.45)

ここに T'_{clad} は、

$$T'_{clad} = \frac{20}{7200}t + 500, \tag{3.46}$$

となる。*T_{in}* は上述の通り、炉心入口温度で 300 [°C] だが、今回の評価では 400 [°C] としている。 よって式(3.45)は、

$$\Delta \delta_{4,FA1} = (3.528 \times 10^{-6} t + 0.156) \sqrt{t - t_{3c}} - \Delta \delta_{3c,FA1}.$$
(3.47)

 $\Delta \delta_{4,FA2}$ は次式で表現される、

$$\Delta \delta_{4,FA2} = F(T_4)\sqrt{t - t_{3c}} - \Delta \delta_{3c,FA2}, \qquad (3.48)$$

ここで T₄ は、出力に応じて 300-400 [°C] となるが、ここでは 400 [°C] を用いている。

 $\Delta \delta_{4,BW}$ lt,

$$\Delta\delta_{4,BW} = F(T_{4,BW})\sqrt{t - t_{3c}} - \Delta\delta_{3c,BW}, \qquad (3.49)$$

ここに*T*_{4,BW} は 480 [°C] を用いている。その他の構成機器 *dW*_{4,others} については、式 (3.23), (3.26) を、時間位置を変えて適用する。

3.3.5 停止(第1サイクル)

3.3.5.1 出力 100-20%

停止時における酸素消費量 W5a は次式で求められる。

$$W_{5a} = W_4 + dW_{5a},\tag{3.50}$$

 dW_{5a} は、

$$dW_{5a} = dW_{5a,FA1} + dW_{5a,FA2} + dW_{5a,BW} + dW_{5a,others},$$
(3.51)

と表される。この時、温度が 400 [°C] 以下となった場合には、起動時の評価式(3.21)-(3.26) について、時間位置を変えて適用すればよい。以下の議論は、温度が 400 [°C] 以上の場合につい てである。それぞれの酸素消費量の増加分は、

$$dW_{5a,FA1} = 1.44S_{FA1}\Delta\delta_{5a,FA1},\tag{3.52}$$

$$dW_{5a,FA2} = 1.44S_{FA2}\Delta\delta_{5a,FA2},\tag{3.53}$$

$$dW_{5a,BW} = 1.44S_{BW}\Delta\delta_{5a,BW},\tag{3.54}$$

となる。また、酸化皮膜量は、

$$\Delta\delta_{5a,FA1} = \int_0^{x_2 - x_1} \left\{ -0.987 + 2.54 \times 10^{-3} \left(T_{in} - \frac{T_{in} - T_{clad}}{x_2 - x_1} \right) x \right\} dx \sqrt{t - t_4} - \Delta\delta_{4,FA1}, \tag{3.55}$$

$$\Delta \delta_{5a,FA2} = F(T_5)\sqrt{t - t_4} - \Delta \delta_{4,FA2}, \qquad (3.56)$$

$$\Delta \delta_{5a,BW} = (-0.987 + 2.54 \times 10^{-3} T_{BW}) \sqrt{t - t_4} - \Delta \delta_{4,BW}.$$
(3.57)

ここに T₅ は 400 [°C] であり、

$$T_{clad} = 3.2P + 200, \tag{3.58}$$

である。ここから式(3.55)は、

$$\Delta \delta_{5a,FA1} = (-0.481 + 8.10 \times 10^{-3} P)\sqrt{t - t_4} - \Delta \delta_{4,FA1}.$$
(3.59)

また式 (3.38) より、式 (3.57) は、

$$\Delta \delta_{5a,BW} = (-0.479 + 7.112 \times 10^{-3} P)\sqrt{t - t_4} - \Delta \delta_{4,BW}$$
(3.60)

となる。

3.3.5.2 出力 20%保持から出力 20-0%

停止時において出力が 20%となり、これを保持し、そこから 0%まで減少させる際の酸素消費 量 W_{5c} は次式で求められる。

$$W_{5c} = W_{5a} + dW_{5c}, ag{3.61}$$

 dW_{5c} は、

$$dW_{5c} = dW_{5c,FA1} + dW_{5c,FA2} + dW_{5c,BW} + dW_{5c,others},$$
(3.62)

と表される。全ての機器が 400 [°C] 以下になるので、

$$dW_{5c,i} = 1.44S_i \Delta \delta_{5c,i},\tag{3.63}$$

$$\Delta\delta_{5c,i} = F(T_5')\sqrt{t - t_{5a}} - \Delta\delta_{5a,i}, \qquad (3.64)$$

ここに *i* は FA1, FA2, BW, others であり、 T'_5 は出力により変化するが、400 [°C] 以下であることから、評価では 400 [°C] としている。なお、

$$S_{others} = S_{all} - S_{FA} - S_{BW}, \tag{3.65}$$

である。

3.3.6 燃料交換(第1サイクル)

燃料交換における酸素消費量 W₆ は次式で求められる。

$$W_6 = W_{5c} + dW_6, (3.66)$$

 dW_6 は、

$$dW_6 = dW_{6,FA}^{old} + dW_{6,FA}^{new} + dW_{6,BW} + dW_{6,others},$$
(3.67)

と表される。BW とその他の機器については、式(3.63)と(3.64)を時間位置をずらして適用 する。また **Fig. 3.3.2** に示すように、*t*_{5c} に到達後、まず BW が引き抜かれる。ここから半分の FA が引き抜かれ、その後、新しい FA が装荷される。

 $dW_{6,FA}^{old} \succeq dW_{6,FA}^{new}$ lt.

$$dW_{6,FA}^{old} = 1.44 \left(S_{FA1}^{old} \Delta \delta_{6,FA1}^{old} + S_{FA2}^{old} \Delta \delta_{6,FA2}^{old} \right), \tag{3.68}$$

$$dW_{6,FA}^{new} = 1.44S_{FA}^{new} \Delta \delta_{6,FA}^{new}, \tag{3.69}$$

であり、

$$\Delta \delta_{6,FA1}^{old} = F(T_6)\sqrt{t - t_{5c}} - \Delta \delta_{5c,FA1}, \qquad (3.70)$$

$$\Delta \delta_{6,FA2}^{old} = F(T_6)\sqrt{t - t_{5c}} - \Delta \delta_{5c,FA2}, \qquad (3.71)$$

$$\Delta \delta_{6,FA}^{new} = F(T_6) \sqrt{t - t_{6,half}}, \qquad (3.72)$$

となる。ここに T_6 は200 [°C]であるが、評価においては400 [°C]としている。 $S_{FA1}^{old}, S_{FA2}^{old}, S_{FA}^{new}$ は時間の関数であり、

$$S_{j}^{old} = \begin{cases} \frac{1}{2}S_{j} \left(1 + \frac{t_{6,half} - t}{t_{6,half} - (t_{5c} + \Delta t_{BW,out})} \right) & (t_{5c} + \Delta t_{BW,out} < t \le t_{6,half}) \\ \frac{1}{2}S_{j} & (t_{6,half} < t \le t_{6} - \Delta t_{BW,in}) \end{cases}$$
(3.73)

ここに j は FA1 と FA2 である。また、

$$S_{FA}^{new} = \begin{cases} 0 & (t_{5c} + \Delta t_{BW,out} < t \le t_{6,half}) \\ \frac{1}{2}S_{FA} \frac{t - t_{6,half}}{t_6 - \Delta t_{BW,in} - t_{6,half}} & (t_{6,half} < t \le t_6 - \Delta t_{BW,in}) \end{cases}$$
(3.74)

となる。



Fig. 3.3.2 燃料交換時の FA 数と時間の関係(第1サイクル終了後)

3.3.7 起動(第2サイクル以降)

3.3.7.1 出力 0-20%

式 (3.19) の dW_{3a} は⁵、燃料交換後の第2サイクル以降については次式で表される、

$$dW_{3a} = dW_{3a,FA}^{old} + dW_{3a,FA}^{new} + dW_{3a,BW} + dW_{3a,others}.$$
(3.75)

それぞれの増加量は、以下の式から求められる。

$$dW_{3a,FA}^{old} = 1.44 \left(\frac{1}{2} S_{FA1} \Delta \delta_{3a,FA1}^{old} + \frac{1}{2} S_{FA2} \Delta \delta_{3a,FA2}^{old} \right),$$
(3.76)

⁵時間を示す 3a, 3b, 3c, 4, 5a, 5c, 6 は、この節以降、第2サイクル(もしくはそれ以降)のものである。

$$dW_{3a,FA}^{new} = 1.44 \left(\frac{1}{2} S_{FA} \Delta \delta_{3a,FA}^{new}\right), \qquad (3.77)$$

BW とその他構成機器の酸素増加量は、式(3.63)の時間位置をずらして適用する。

第2サイクル以降の、 $\Delta \delta_{3a,FA}$ 、 $\Delta \delta_{3a,BW}$ そして $\Delta \delta_{3a,others}$ は、以下の式から求められる。

$$\Delta \delta_{3a,FA1}^{old} = F(T_3)\sqrt{t} - \Delta \delta_{6,FA1}^{old}, \qquad (3.78)$$

$$\Delta \delta^{old}_{3a,FA2} = F(T_3)\sqrt{t} - \Delta \delta^{old}_{6,FA2}, \qquad (3.79)$$

$$\Delta \delta_{3a,FA}^{new} = F(T_3) \sqrt{t - t_{6,half}} - \Delta \delta_{6,FA}^{new}, \qquad (3.80)$$

$$\Delta \delta_{3a,BW} = F(T_3) \sqrt{t - (t_6 - \Delta t_{BW,in}) - \Delta \delta_{6,BW}}, \qquad (3.81)$$

$$\Delta \delta_{3a,others} = F(T_3)\sqrt{t} - \Delta \delta_{6,others}.$$
(3.82)

*T*₃ は出力に応じて変化するが、この段階では *T*₃ < 400 [°C] のため、今回の評価では 400 [°C] を 用いている。

3.3.7.2 出力 20%保持

今回の評価では、出力 20%の場合、すべての機器の温度は 400 [°C] 以下のため、「出力 0-20%」の式を適用する。

3.3.7.3 出力 20-100%

第2サイクル以降において、式(3.27)の dW_{3c} は次式で表される、

$$dW_{3c} = dW_{3c,FA}^{old} + dW_{3c,FA}^{new} + dW_{3c,BW} + dW_{3c,others}.$$
(3.83)

それぞれの増加量は、以下の式から求められる。

$$dW_{3c,FA}^{old} = 1.44 \left(\frac{1}{2} S_{FA1} \Delta \delta_{3c,FA1}^{old} + \frac{1}{2} S_{FA2} \Delta \delta_{3c,FA2}^{old} \right),$$
(3.84)

$$dW_{3c,FA}^{new} = 1.44 \left(\frac{1}{2} S_{FA1} \Delta \delta_{3c,FA1}^{new} + \frac{1}{2} S_{FA2} \Delta \delta_{3c,FA2}^{new} \right),$$
(3.85)

なお、BW とその他機器についての酸素消費量増加分は、第1サイクルと同じ表現となる。 400 [°C] を超えた時の、FA1 に関する酸化皮膜の増加量は、

$$\Delta \delta_{3c,FA1}^{old} = (-0.2405 + 3.795 \times 10^{-3} P) \sqrt{t - (t_{3b} + t_{3,400})} - \Delta \delta_{3a,FA1}^{old}, \qquad (3.86)$$

$$\Delta \delta_{3c,FA1}^{new} = (-0.2405 + 3.795 \times 10^{-3} P) \sqrt{t - (t_{3b} + t_{3,400})} - \Delta \delta_{3a,FA1}^{new}, \quad (3.87)$$

となる。400 [°C] 以下の場合、および FA2、BW、その他構成機器については、「出力 0-20%」の 式を用いる。

3.3.8 定格運転(第2サイクル以降)

第2サイクル以降において、式(3.40)の dW₄ は次式で表される、

$$dW_4 = dW_{4,FA}^{old} + dW_{4,FA}^{new} + dW_{4,BW} + dW_{4,others}.$$
(3.88)

それぞれの増加量は、以下の式から求められる。

$$dW_{4,FA}^{old} = 1.44 \left(\frac{1}{2} S_{FA1} \Delta \delta_{4,FA1}^{old} + \frac{1}{2} S_{FA2} \Delta \delta_{4,FA2}^{old} \right), \tag{3.89}$$

$$dW_{4,FA}^{new} = 1.44 \left(\frac{1}{2} S_{FA1} \Delta \delta_{4,FA1}^{new} + \frac{1}{2} S_{FA2} \Delta \delta_{4,FA2}^{new}\right), \qquad (3.90)$$

BW とその他機器についての酸素消費量増加分は、第1サイクルと同じ表現となる。また酸化皮 膜の増加量についても、第1サイクルと同じ表現になる。

3.3.9 停止(第2サイクル以降)

第2サイクル以降の停止については、基本的に第1サイクルと同じ考え方であり、前節の定格 運転と同様に、酸素消費の増加量を

$$dW_{5a,FA}^{old} = 1.44 \left(\frac{1}{2} S_{FA1} \Delta \delta_{5a,FA1}^{old} + \frac{1}{2} S_{FA2} \Delta \delta_{5a,FA2}^{old} \right), \tag{3.91}$$

$$dW_{5a,FA}^{new} = 1.44 \left(\frac{1}{2} S_{FA1} \Delta \delta_{5a,FA1}^{new} + \frac{1}{2} S_{FA2} \Delta \delta_{5a,FA2}^{new} \right),$$
(3.92)

のような形で、old と new で分けて考える。

3.3.10 燃料交換(第2サイクル以降)

第1サイクルの式 (3.67) に対して、 $dW_{6,FA}^{old}$ と $dW_{6,FA}^{new}$ は、

$$dW_{6,FA}^{old} = 1.44 \left(S_{FA1}^{old} \Delta \delta_{6,FA1}^{old} + S_{FA2}^{old} \Delta \delta_{6,FA2}^{old} \right), \tag{3.93}$$

$$dW_{6,FA}^{new} = 1.44S_{FA}^{new}\Delta\delta_{6,FA}^{new} \tag{3.94}$$

となる。そして酸化皮膜の増加量は、

$$\Delta \delta_{6,FA1}^{old} = F(T_6)\sqrt{t - t_{5c}} - \Delta \delta_{5c,FA1}, \qquad (3.95)$$

$$\Delta \delta_{6,FA2}^{old} = F(T_6)\sqrt{t - t_{5c}} - \Delta \delta_{5c,FA2}, \qquad (3.96)$$

$$\Delta \delta_{6,FA}^{new} = F(T_6) \sqrt{t - t_{6,half}}, \qquad (3.97)$$

となる。ここに T₆ は 200 [°C] であるが、評価においては 400 [°C] としている。

 $S_{FA1}^{old}, S_{FA2}^{old}, S_{FA}^{new}$ は時間の関数であり、

$$S_{j}^{old} = \begin{cases} \frac{1}{2}S_{j} \frac{t_{6,half} - t}{t_{6,half} - (t_{5c} + \Delta t_{BW,out})} & (t_{5c} + \Delta t_{BW,out} < t \le t_{6,half}) \\ \frac{1}{2}S_{j} & (t_{6,half} < t \le t_{6} - \Delta t_{BW,in}) \end{cases}$$
(3.98)

ここに *j* は FA1 と FA2 である。また、

$$S_{FA}^{new} = \begin{cases} \frac{1}{2}S_j & (t_{5c} + \Delta t_{BW,out} < t \le t_{6,half}) \\ \frac{1}{2}S_{FA}\frac{t - t_{6,half}}{t_6 - \Delta t_{BW,in} - t_{6,half}} & (t_{6,half} < t \le t_6 - \Delta t_{BW,in}) \end{cases}$$
(3.99)

となる。ただし、**Fig. 3.3.3**に示すように、 $t_{6,half}$ の時点で、old と new の扱いを変更する。



Fig. 3.3.3 燃料交換時の FA 数と時間の関係(第2サイクル以降)

4. 結果と考察

4.1 基礎式に基づく結果

第3章で定式化した内容を基に、JAEA-ADS における酸素消費量の評価を行った。なお評価で 用いた表面積と、**Table 2.1.3**の表面積の関係は以下の通りである。

$$S_{FA1} = S_{2,1} \tag{4.1}$$

$$S_{FA2} = S_{1,1} + S_{2,2} + S_{3,1} \tag{4.2}$$

$$S_{BW} = S_{2,4}$$
 (4.3)

Sothers はこれら以外の表面積の合計である。

基礎式に基づく結果として、第2サイクルまでの各構成機器の酸化皮膜量を Fig. 4.1.1 に示 す。FA の発熱部 (FA1) については、運転開始とともに温度が上昇し、酸化皮膜量が増加するこ とがわかる。2サイクルの炉内滞在で、燃料ピンの発熱部分には最大で約 35 [µm] の酸化皮膜が 作られる。BW については、1サイクルごとに交換することを考えているが、使用温度が高いこ とから、1回の運転で約 20 [µm] の酸化皮膜が作られる結果となった。FA の発熱部以外 (FA2) とその他の構成機器については、基本的に運転中も 400 [°C] 以下になることから、酸化皮膜の形 成は同じ速度で進み、FA2 は途中で交換される。

この酸化皮膜量の評価結果から求めた酸素消費量を **Fig. 4.1.2** に示す。FA1 は、作られる酸 化皮膜量が多く、表面積も大きいため、酸素消費量が多い。一方 BW は、作られる酸化皮膜量は 多いものの、表面積が小さいため、消費量としては少ないことがわかった。その他の構成機器に ついては、表面積が大きいため酸素消費量が多い。結果として、サイクルあたりの酸素消費量は FA 全体(FA1+FA2)と BW それぞれで、25 [kg] と 0.3 [kg] となり、プラント全体としては約 30 [kg] となった。

Fig. 4.1.3 に全運転期間における酸素消費量を示す。あわせて FA と BW 以外の構成機器の酸 素消費量を示す。40 年間の全酸素消費量は 1141 [kg] と評価された。40 年時点での FA と BW 以 外の構成機器に形成される酸化皮膜量は 17.3 [μm] であり、その酸素消費量は 119 [kg] となった。

なお酸素消費率 [g/h] を評価したところ、定格運転中は3-4 [g/h] 程度であったが、運転開始 時では最大で約150 [g/h] の酸素消費率となった。今後、酸素供給装置を検討する際には、これら の値を条件に検討する必要がある。



Fig. 4.1.1 各構成機器の酸化皮膜量(第2サイクルまで)



Fig. 4.1.2 各構成機器の酸素消費量(第2サイクルまで)



Fig. 4.1.3 JAEA-ADSの酸素消費量(40年間)

4.2 感度解析

4.2.1 検討条件

得られた結果に対して、プラントの系統温度がどのくらい影響するかを確認するため、温度に 関する感度解析を実施した。

ここでは2つのケースを対象とした。1つ目は温度を100 [°C] 下げたケースである。LBE によ る鋼材腐食を考えた場合、系統温度が低いほうが腐食量が少なく、またオーステナイト系の鋼材 を用いることも可能となる。オーステナイト系の鋼材を用いることで、T91 鋼の問題点の一つで ある中性子照射による延性脆性遷移温度(DBTT)の上昇を避けることができる。このような点 を考慮し、系統温度を一律で100 [°C] 下げた場合の評価を行った。

もう1つは、温度を100 [°C] 上げたケースを対象とした。付録 A で議論しているように、ビス マスの資源量は生産量、埋蔵量の点から十分と考えられる一方、そのほとんどを中国に依存する 可能性が高く、また価格が高い。仮に鉛単体で冷却する場合、融点(鉛の融点は327.5 [°C])が上 がり、系統温度を上げる必要があるが、価格を3分の1以下に圧縮することができ、資源の確保 もビスマスより容易と考えられる。さらに Bi-209 の中性子捕獲反応で生成する Po-210 は毒性が 強く、その取り扱いが問題となるが、Pb 冷却にすることでこの問題を回避することもできる。す なわち高温概念 (Pb 冷却型概念)⁶として、現在の系統温度を100 [°C] 上げた概念を対象とする。 なおこれらの2つの概念はまだ具体化されていないため、温度を一律に100 [°C] 上下させるだ

⁶文献 ⁵⁾ は、もともと Pb 冷却型 ADS である EFIT を対象としているので、基礎式をそのまま使える。

けで、材料や機器はこれまでと同じと仮定し、評価する。この場合、高温概念については、被覆 管表面温度および BW が 550 [°C] を超えるが、腐食防止の観点から、設計の上限として最高温度 550 [°C] を設定する。主要な温度条件を Table 4.2.1 にまとめる。

4.2.2 高温概念検討のための式修正

高温概念の検討においては温度が高くなることから、第3章で提示した式のうち、いくつかを 修正する必要がある。修正すべき式は、運転開始時から運転停止時において出力 *P* と関係のある 式である。なお、常に 400 [°C] 以上になるため、**Fig. 3.3.1** に示す Δt₄₀₀ は不要となる。

式(3.32)における T_{clad} は、高温概念では、

$$T_{clad} = 1.5P + 400, \tag{4.4}$$

となることから、運転開始時の FA1 の酸化皮膜量 $\Delta \delta_{3c,FA1}$ は⁷、

$$\Delta \delta_{3c,FA1} = (0.029 + 1.91 \times 10^{-3} P) \sqrt{t - t_2} - \Delta \delta_{2,FA1}, \tag{4.5}$$

となる。同様に $\Delta \delta_{3c,FA2}$ についても式(3.32)が適用できる。この時、 T_{clad} を T_{FA2} とすると、

$$T_{FA2} = P + 400, \tag{4.6}$$

となり、

$$\Delta \delta_{3c,FA2} = (0.029 + 1.27 \times 10^{-3} P) \sqrt{t - t_2} - \Delta \delta_{2,FA2}, \tag{4.7}$$

と表すことができる。

BW については、式 (3.37) における T_{BW} が、

$$T_{BW} = 1.5P + 400, \tag{4.8}$$

となることから、 $\Delta \delta_{3c,BW}$ は、

$$\Delta \delta_{3c,BW} = (0.029 + 3.81 \times 10^{-3} P) \sqrt{t - t_2} - \Delta \delta_{2,BW}, \tag{4.9}$$

となる。

最後に、残りの構成機器については、高温概念の場合、多くの構成機器が 400 [°C] を超える温 度で用いられる。400 [°C] を超える温度で使われる構成機器を others1、400 [°C] のままで用いら れる構成機器を others2 とすると、それぞれの表面積 *S*_{others1} と *S*_{others2} は、**Table 2.1.3** から、

$$S_{others1} = S_{1,2} + S_{1,3} + S_{1,4} + S_{2,3} + S_4,$$
(4.10)

$$S_{others2} = S_{3,2} + S_{3,3} + S_{3,4}, \tag{4.11}$$

⁷時間位置を 3c としているが、Pb 冷却型の場合、3a からこれらの式が適用される。

と分けられる。このうち others1 の酸化皮膜量 $\Delta \delta_{3c,others1}$ は、式(3.37)を参考にして以下のように書ける、

$$\Delta \delta_{3c,others1} = (-0.987 + 2.54 \times 10^{-3} T_{others1}) \sqrt{t - t_2} - \Delta \delta_{2,others1}, \tag{4.12}$$

ここに

$$T_{others1} = P + 400,$$
 (4.13)

であることから、

$$\Delta \delta_{3c,others1} = (0.029 + 2.54 \times 10^{-3} P) \sqrt{t - t_2} - \Delta \delta_{2,others1}, \tag{4.14}$$

となる。なお others2 の酸化皮膜量は、 $\Delta \delta_{3a,others}$ (式 (3.26))と同じである。

4.2.3 解析結果と考察

燃料集合体の酸化皮膜量の経時変化を **Fig. 4.2.1** に示す。燃料集合体の結果においては、基本的に燃料ピン(FA1)の酸化皮膜量をプロットしているが、高温概念については燃料ピン以外 (FA2)についても結果を示している。高温概念では、第2サイクルまでの間に、FA1において 43 [μm]、FA2において 32 [μm] の酸化皮膜ができると評価された。なお低温概念では約 4 [μm] と なった。

BW に形成される酸化皮膜量の結果を **Fig. 4.2.2** に示す。BW の酸化皮膜量は、低温概念にお いて 2.5 [μm]、高温概念において 37 [μm] となった。

その他の構成機器の酸化皮膜量の経時変化を Fig. 4.2.3 に示す。高温概念の others1 以外は、 400 [°C] 以下であることから同じ変化となった。others1 については、酸化皮膜の生成量が多く、 第2サイクル終了時点で 54 [µm] となった。これらの機器は運転中、500 [°C] の状態が続くため、 酸化皮膜の生成量が FA や BW よりも多い。

次に、第2サイクルまでの低温概念および高温概念の酸素消費量を Fig. 4.2.4 と Fig. 4.2.5 に示す。低温概念の場合、第2サイクルまでの酸素消費量は約45 [kg] であり、最も寄与が大きい のは、表面積が大きいその他構成機器(others)だった。一方、高温概念においては、第2サイク ルまでの酸素消費量は約430 [kg] となり、低温概念のおよそ10倍となった。寄与としては、高温 状態で用いられるその他構成機器(others1)が大きく、70%程度を占めている。また、どちらの ケースにおいても BW の寄与は小さいことがわかる。なお JAEA-ADS の結果(Fig. 4.1.2)と 比較すると、JAEA-ADS では、FA1による酸素消費の寄与が大きいのに対し、低温及び高温概念 では FA2 の寄与のほうが大きい。これは元々FA2 の表面積が FA1 よりも大きいためと考えられ る。低温及び高温概念では、温度条件が FA1 と FA2 でほぼ同じのため、表面積の違いが酸素消費 量に影響する。一方、JAEA-ADS では FA1 のみが 400 [°C] を超えるため、酸素消費量が FA2 よ りも大きくなる。

各概念の 40 年間の酸素消費量を Fig. 4.2.6 にプロットした。高温概念においては、酸素消費量が JAEA-ADS の約 8 倍となり、より大規模な酸素供給装置を考える必要がある。一方、低温

概念の場合、JAEA-ADSの半分以下の酸素消費量となった。装置としては、よりコンパクトなものを採用できる可能性がある。

主要な解析結果を Table 4.2.2 にまとめた。低温概念の酸化皮膜量は、JAEA-ADS と比較する と一桁少ない傾向にあり、酸素消費量を少なくすることができる反面、鋼材の防食効果を考える と少ない可能性がある。運転開始前の調整期間を長く取り、その間は温度を高めにするなどして、 酸化皮膜を積極的に作ることが必要と考える。高温概念については、酸化皮膜量は JAEA-ADS より多いものの、極端に大きな差があるわけではない。しかしながら、酸素消費量に置き換える と差は大きくなり、高温概念では、全体として約8倍の酸素が必要となる。また 3.2 節で議論し たように、基礎式は 500 [°C] 以上の高温条件に対して酸化皮膜量を過小評価する可能性があるた め、酸素消費量はさらに多くなる可能性がある。

最後に、各概念の酸素消費率を Table 4.2.3 に示す。高温概念の場合、JAEA-ADS に比べて酸素消費率がほぼ1桁大きいため、装置の規模も大きくなると予想される。

Table 4.2.1 次反用	がのクース設め	E	
	JAEA-ADS	低温概念	高温概念
冷却材入口温度 [°C]	300	200	400
冷却材出口温度 [°C]	400	300	500
被覆管表面最大温度 (BOC/EOC)*1 [°C]	500/520	400/420	550/550
BW 最大温度 [°C]	480	380	550
冷温停止温度 [°C]	200	170	370

Table 4.2.1 感度解析のケース設定

*1: Beginning of Cycle and End of Cycle.

Table 4.2.2 感度解析の主要な結果					
	JAEA-ADS	低温概念	高温概念		
最大酸化皮膜量(FA) [μm/2 サイクル]	35	4.1	43		
最大酸化皮膜量(BW) [µm/サイクル]	20	2.5	37		
酸素消費量(FA) [kg/サイクル]	25	7.3	70		
酸素消費量(BW) [kg/サイクル]	0.3	0.035	0.52		
酸素消費量(全体) [kg/サイクル]	31	13	212		
酸素消費量(全体、40 サイクル) [kg]	1141	423	8494		

Table 4.2.3 各ケースの酸素消費率

	JAEA-ADS	低温概念	高温概念
定格運転時 [g/h]	3 - 4	1 - 2	15 - 30
ピーク時(運転開始時)[g/h]	約 150	約3	約 1200



Fig. 4.2.1 燃料集合体の酸化皮膜量(第2サイクルまで)



Fig. 4.2.2 ビーム窓の酸化皮膜量(第2サイクルまで)



Fig. 4.2.3 その他構成機器の酸化皮膜量(第2サイクルまで)



Fig. 4.2.4 低温概念における酸素消費量(第2サイクルまで)



Fig. 4.2.5 高温概念における酸素消費量(第2サイクルまで)



Fig. 4.2.6 各概念の酸素消費量(40年間)

結言 5.

本研究では、JAEA-ADS の運転停止に関する流れを明確化し、文献⁵⁾の内容を基にして、プ ラントとして必要となる酸素量の評価を行った。その結果、FA の発熱部については、2 サイクル の炉内滞在で、最大で約 35 [µm] の酸化皮膜が作られ、BW については、1 回の運転で約 20 [µm] の酸化皮膜が作られることがわかった。この酸化皮膜量の評価結果から酸素消費量を求めた。結 果として、サイクルあたりの酸素消費量は FA 全体と BW それぞれで、25 [kg] と 0.3 [kg] となり、 プラント全体としては約 30 [kg] となった。また、JAEA-ADS の運転期間である 40 年間の全酸素 消費量は、1141 [kg] と評価された。

得られた結果に対して、プラントの系統温度がどのくらい影響するかを確認するため、温度に 関する感度解析を実施した。検討ケースとして、系統温度を 100 [°C] 下げるもしくは上げるケー スを対象とした。その結果、FA については、第 2 サイクルまでの間に、低温概念と高温概念それ ぞれにおいて、最大 4 [μm] と 43 [μm] の酸化皮膜ができると評価された。BW の酸化皮膜量は、 低温概念において 2.5 [μm]、高温概念において 37 [μm] となった。この結果に基づくサイクルあた りの酸素消費量は、低温概念と高温概念それぞれにおいて 13 [kg] と 212 [kg] となり、JAEA-ADS の値に対して 42 %と 6.8 倍となった。

最終的な結果として、JAEA-ADS では、定格運転時 3 - 4 [g/h]、ピーク時約 150 [g/h] の酸素 を供給でき、1 サイクル(=1 年間)約 30 [kg]、40 年間で約 1200[kg] を供給できる酸素供給装置 が必要となる。なお、これらの結果は 400 [°C] 以上の温度に大きな感度があるため、予測精度を 上げるためには、より詳細なプラント全体の温度分布を解析する必要がある。

謝辞

本検討を行うにあたり、J-PARC センター 核変換ディビジョン ターゲット技術開発セクション の吉元秀光氏には、構成機器の面積評価においてご尽力いただきました。ここに感謝の意を表し ます。

原子力基礎工学研究センター 分離変換技術開発ディビジョン 核変換システム開発グループの 西原健司グループリーダーには、多くの有益なコメントを頂きました。また、原子力基礎工学研 究センター 燃料・材料工学ディビジョン 照射材料工学研究グループの大久保成彰氏には、材料の 専門家として有益なコメントを頂きました。両氏に心より感謝致します。

参考文献

- 辻本 和文, 西原 健司, 武井 早憲 他, "鉛ビスマス冷却加速器駆動システムを用いた核変換技術の成立性検討", JAEA-Research 2010-012, (2010), 59p.
- T. Sugawara, R. Katano and K. Tsujimoto, "Impact of impurity in transmutation cycle on neutronics design of revised accelerator-driven system", *Annals of Nuclear Energy*, 111, pp. 449-459 (2018).
- T. Sugawara, H. Takei, H. Iwamoto et al., "Research and Development Activities for Accelerator-Driven System in JAEA", *Progress in Nuclear Energy*, 106, pp. 27-33 (2018).
- OECD/NEA Nuclear Science Committee, "Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies, 2007 edition", OECD/NEA, (2007), 691p.
- A. Weisenburger, L. Mansani, G. Schumacher, et al., "Oxygen for protective oxide scale formation on pins and structural material surfaces in lead-alloy cooled reactors", *Nuclear Engineering and Design*, 273, pp. 584-594 (2014).
- T. Sugawara, H. Takei and K. Tsujimoto, "Investigations of accelerator reliability and decay heat removal for accelerator-driven system", *Annals of Nuclear Energy*, 125, pp. 242-248 (2019).
- 7) 山本 寿, 石井 愛典, 野本 昭二, 他, "高速実験炉「常陽」性能試験報告書 臨界近接 (NT-11)", PNC-TN941 80-04, (1980), 221p.
- 8)日本原子力研究開発機構, "平成25年度文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業原子 カシステム研究開発事業加速器駆動未臨界システムによる核変換サイクルの工学的課題解決 に向けた研究開発成果報告書",日本原子力研究開発機構, (2014).
- 9) 小松 篤史, "溶融鉛ビスマス中の材料腐食試験", 加速器を用いた分離変換研究に関する研究 交流会, P-18, 日本原子力研究開発機構, (2019).
- 10) Y. Kurata, M. Futakawa, S. Saito, "Comparison of the corrosion behavior of austenitic and ferritic/martensitic steels exposed to static liquid Pb-Bi at 450 and 550° C", J. Nucl. Mater., 343, pp. 333-340 (2005).
- 11) H. Dong, Z. Ye, P. Wang, et al., "Effect of cold rolling on the oxidation resistance of T91 steel in oxygen-saturated stagnant liquid lead-bismuth eutectic at 450 °C and 550 °C", J. Nucl. Mater., 476, pp. 213-217 (2016).

- 12) G. Ilincev, D. Karnic, M. Paulovic, A. Doubkova, "The effect of temperature and oxygen content on the flowing liquid metal corrosion of structural steels in the Pb-Bi eutectic", *Nucl. Eng. Design*, 236, pp. 1909-1921 (2006).
- C. Schroer, O. Wedemeyer, A. Skrypnik, et al., "Corrosion kinetics of Steel T91 in flowing oxygen-containing lead-bismuth eutectic at 450 °C", J. Nucl. Mater., 431, pp. 105-112 (2012).
- 14) V. Tsisar, C. Schroer, O. Wedemeyer, A. Skrypnik, J. Konys, "Characterization of corrosion phenomena and kinetics on T91 ferritic/martensitic steel exposed at 450 and 550 °C to flowing Pb-Bi eutectic with 10⁻⁷ mass% dissolved oxygen", J. Nucl. Mater., 494, pp. 422-438 (2017).
- 15) L. Martinelli, T. Dufrenoy, K. Jaakou, et al., "High temperature oxidation of Fe-9Cr-1Mo steel in stagnant liquid lead-bismuth at several temperatures and for different lead contents in the liquid alloy", J. Nucl. Mater., 376, pp. 282-288 (2008).
- F. Barbier, A. Rusanov, "Corrosion behavior of steels in flowing lead-bismuth", J. Nucl. Mater., 296, pp. 231-236 (2001).
- 17) O. Yeliseyeva, V. Tsisar, G. Benamati, "Influence of temperature on the interaction mode of T91 and AISI 316L steels with Pb-Bi melt saturated by oxygen", *Corros. Sci.*, 50, pp. 1672-1683 (2008).
- 18) F. Gnecco, E. Ricci, C. Bottino, et al., "Corrosion behaviour of steels in lead-bismuth at 823 K", J. Nucl. Mater., 335, pp. 185-188 (2004).
- A. Doubkova, F. D. Gabriele, P. Brabec, et al., "Corrosion behavior of steels in flowing lead-bismuth under abnormal conditions", J. Nucl. Mater., 376, pp. 260-264 (2008).
- 20) L. Soler, F. J. Martin, F. Hernandez, et al., "Corrosion of stainless steels in lead-bismuth eutectic up to 600 °C", J. Nucl. Mater., 335, pp. 174-179 (2004).

付録 A ビスマスの資源量について

A.1 はじめに

文献 [A-1] においてビスマスの資源量調査が行われたが、その調査から 20 年が経過した。ここでは、最近のビスマス資源量を調査し、また現在の ADS 設計内容を踏まえ、LBE 冷却の考えが 妥当かどうか考察する。

A.2 資源量の調査

ビスマス資源量の調査は、過去の検討と同様、文献 [A-2] に公開されているデータをもとに行っ た。Fig. A.2.1 には、鉱山におけるビスマス生産量を示す。2003 年以降、中国での生産量が増 加し、2016 年には 6500 トンの急激な増産が見られる。また 2013 年以降、ベトナムやラオスでの 生産が行われている。直近の生産量としては、全世界で 18,000 トン/年のビスマスが生産されて いる。これらは金属材料への添加や医療用など幅広い分野で用いられている。

Fig. A.2.2 には、ビスマスの埋蔵量を示した。ここに埋蔵量とは、決められた時期に経済的に 抽出可能なものを意味する(生産設備が整っている必要はない)。2019 年時点での埋蔵量は 37 万 トンであり、そのほとんどは中国にある。



Fig. A.2.1 鉱山におけるビスマスの生産量

JAEA-Research 2020-016





A.3 評価と考察

現在 JAEA で検討している ADS の炉容器内径は 11.2 m、LBE 領域高さは 11.7 m である。様々 な構成機器が炉容器内に存在するが、これら全てを LBE とみなした時の 1 基あたりの LBE 量は 1153 m³、重さにすると 11,915 トンとなる。Pb:Bi = 44.5:55.5 を想定した場合、ビスマスの重量 は 6,553 トンとなる。これは全世界の鉱山における 1 年間のビスマス生産量の 3 分の 1 に相当す る。実際には数年かけて調達すると考えられるが、生産量に対する割合は比較的大きいため、ビ スマス価格にも影響すると考えられる。

これまでの JAEA における検討では、ADS 4 基により、国内の MA を核変換していくというシ ナリオであったが、この場合、全体で 26,212 トンのビスマスが必要となる。埋蔵量を見る限り、 この量を調達することは問題ないと考えられるが、そのほとんどを中国に頼ることになる。中国 では、ビスマス資源を考慮して Pb 冷却型 ADS を検討している。そのため、原子力用途で大量の ビスマスを輸出することを許可するかどうか不透明である。

Fig. A.3.1 には、ビスマス価格の推移を示した。2007 年から約 10 年間価格が高騰していたが、 中国での増産(Fig. A.2.1)により価格が安定していると考えられる。Fig. A.3.1 の平均を取 ると、5.67 [\$/pound] であり、これを kg 単位に換算すると 12.5 [\$/kg] となる。このデータから ADS1 基あたりに必要な LBE の金額は Table A.3.1 のとおりになる (\$1=110 JPY で換算)。ビ スマスの購入に必要な金額は約 90 億円となり、この場合、ADS1 基のための冷却材費用は約 100 億円になる。一方、Pb 冷却の場合は約 30 億円となり、冷却材費用は 3 分の 1 以下に圧縮できる。 Table A.3.1 ADS1 基あたりに必要な冷却材費用(単位:百万円)

	Pb^*	Bi	Total
LBE 冷却	$1,\!298$	9,007	$10,\!305$
Pb 冷却	2,884	-	2,884

*: Pbの値段は 2,200 [\$/ton] [A-2] で計算



Fig. A.3.1 ビスマスの価格の推移

A.4 まとめ

ビスマスの資源量調査を行った。生産量、埋蔵量の数字からは、JAEA が検討している ADS に 必要な量は確保できると考えられるが、そのほとんどを中国に依存する可能性が高く、どこまで 現実的かは不透明である。

また費用についても評価した。LBE 冷却の場合、ADS1 基あたり冷却材費用として 100 億円が 必要となるが、Pb 冷却の場合、これを3分の1以下に圧縮することができる。結論として、LBE 冷却型概念については、必要なビスマス量は存在するが、高価であり、そのほとんどを中国に依 存することになる。資源として確保しやすく、冷却材コストが安価である Pb 冷却型概念につい ても、今後オプションとして検討するべきと考える。

A.5 参考文献

[A-1] 高野 秀機, 滝塚 貴和, 北野 照明, "溶融金属鉛・ビスマス技術における腐食, 水反応, ポ ロニウム揮発率及び Bi 資源量の調査・検討", JAERI-Review 2000-014, (2000), 134p.

[A-2] U.S. National Minerals Information Center, Mineral Commodity Summaries,

https://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries (参照 2020/3/19) .

_

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本ì	単位			
本平里	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	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単	位の例
AI 立 是 SI 組 立 単位	
名称	記号
面 積 平方メートル	m ²
体 積 立方メートル	m ³
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2
波 数 毎メートル	m ⁻¹
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1
比 透 磁 率 ^(b) (数字の) 1	1
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では	t物質濃度

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (h)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM物告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語							
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号		
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d		
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с		
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m		
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ		
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n		
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р		
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f		
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а		
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z		
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v		

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位					
名称	記号	SI 単位による値			
分	min	1 min=60 s			
時	h	1 h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(π/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad			
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1 t=10^3 kg$			

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの						
名称 言			記号	SI 単位で表される数値		
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J		
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg		
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da		
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m		

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な間径は
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値		
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T		
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹		
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」				

は対応関係を示すものである。

			表	10.	SIに 尾	属さないその他の単位の例
	-	名利	5		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$