

液体金属の基礎化学調査研究(Ⅱ) 報 告 書

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2000年3月

(財)若狭湾エネルギー研究センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Sections,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4 -49,Muramatsu,Tokai-Mura,Naka-Gun,Ibaraki-Ken,319-1194
Japan

○核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute) 2000

液体金属の基礎化学調査研究 (II)

丸山 忠司^{*1}、埜田 昭夫^{*1}

要旨

液体金属を高速炉の冷却材ならびに一般産業で利用する際必要となる液体金属の利用技術ならび化学的挙動に関して調査を実施した。

液体金属の利用技術調査としては、鉛、鉛・ビスマス冷却高速炉開発の動向ならびにロシアにおける利用技術の調査、国内の亜鉛・鉛の精錬工場における液体金属の取り扱い、および英国における使用済みナトリウムの処理技術の調査を行った。液体金属の安全性に関してはナトリウムをはじめ 10 種類の液体金属の特性、危険性、安全取扱いについて文献情報を収集し、さらにナトリウムの事故・トラブル事例および九州地区にある一般化学工場における安全対策とその取組みについて調査した。その結果、ロシアでは高速炉開発に向けた液体重金属の研究実績が豊富にあることがわかった。また国内の一般産業と原子力分野では、液体金属に対する技術的取組みに大きな差のあることがわかり、一方、安全対策活動に対する従業員の取組みでは両分野に共通するものが見られた。

化学的挙動調査としては、Li, Na, K, Mg, Zn, Hg, Al, Ga, Sn, Pb, Bi, Li-Pb, Na-K, Pb-Bi. の 14 種類の液体金属に対して 11 種類の化学熱力学的データ等に関する文献検索を行い、研究分野の傾向の分析ならびにアブストラクト集作成のための文献調査を実施した。また、液体金属の活性抑制金属の可能性についても検討した。

本報告書は核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務の成果である。

契約番号：11C0624

サイクル機構担当者：山田文昭（敦賀本部国際技術センター）

*1：(財)若狭湾エネルギー研究センター

Studies on Basic Chemistry of Liquid Metals (II)

Tadashi Maruyama^{*1}, Akio Noda^{*1}

Abstract

An extensive survey was made of the utilization technology and chemical properties of liquid metals which are used as the coolant in fast reactors as well as general industrial materials.

As for studies of utilization technologies, reviews were made on the present status of research and development of Pb or Pb-Bi-cooled fast reactors in Japan and Russia, a status of utilization in a domestic smelting factory of Pb and Zn, and the processing and disposition technology of spent sodium in the United Kingdom. Also, the information has been collected as to the materials properties, safe treatment technologies of liquid metals and accidents or trouble incidents in sodium industries. In addition, a review tour was made to collect information on the safety measure and the activities on safety culture in several general chemical engineering works in Kyushu island. Through out these studies, it was found that there were abundant experiences and data on heavy liquid metals in Russia for use in development of fast reactors. It was also found that there were large differences in the attitude toward the technology of liquid metals between those of general industries and nuclear industries, whereas common items were found in the activities for achievement of safety culture in both industries.

As for chemical properties of liquid metals, a literature survey and analysis of general research trend were made for 11 kinds of materials properties on 14 materials, such as Li, Na, K, Mg, Zn, Hg, Al, Ga, Sn, Pb, Bi, Li-Pb, Na-K, Pb-Bi. Furthermore, a study of possible inhibitor to reduce chemical activity of liquid metals was made.

This work was performed under the contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute

Contract No:11C0624

JNC Liaison: Fumiaki Yamada (International Cooperation and Technology Development Center, Tsuruga head quarter Office)

*1: The Wakasa Wan Energy Research Center

目 次

第 1 章 緒言	1
第 2 章 利用技術調査研究	6
2.1 取扱い技術の調査	6
2.1.1 鉛・鉛ビスマスの高速炉開発の動向	6
2.1.2 ロシアにおける鉛・鉛ビスマス利用技術の現状	16
2.1.3 八戸製錬における亜鉛・鉛の製錬	37
2.1.4 使用済みナトリウム処理技術の調査	44
2.2 液体金属の取扱いと事故トラブルの調査	49
2.2.1 液体金属(Na)の安全性に関する文献情報	49
2.2.2 液体金属(Na 以外)の特性と取扱いについて	57
2.2.3 事故トラブル事例 (Na)	62
2.3 利用施設の安全対策調査	76
2.3.1 化学工業における安全対策	76
第 3 章 化学挙動評価研究	87
3.1 化学的データの収集	87
3.1.1 収集方法	87
3.1.2 収集結果	88
3.2 活性抑制金属の可能性検討	93
3.2.1 活性抑制金属の可能性について	93
第 4 章 まとめ	98

図表一覧

表 1.1	液体金属の基礎化学調査研究委員会委員名簿	2
表 1.2	液体金属の基礎化学調査研究委員会 活動記録	4
表 2.1	鉛・ビスマス、鉛およびナトリウム冷却材の特性	7
表 2.2	鉛冷却材高速炉 B R E S T 3 0 0 の仕様	14
表 2.3	液体金属の特性と取り扱いについて	58
表 2.4	我が国における N a 漏洩・火災事故事例リスト	66
表 2.5	外国における N a 火災事故事例リスト	67
表 2.6	外国における N a 漏洩事例リスト	68
表 2.7	外国の蒸気発生器における N a - 水反応事例	71
表 3.1	液体金属の化学的挙動文献データ検索結果	97
図 2.1	鉛冷却高速炉 B R E S T 3 0 0	13
図 2.2	B R E S T 3 0 0 炉心のレイアウト	14
図 2.3	従来型システム構成と直接接触伝熱型蒸気発生器	15
図 2.4	溶錬工程	41
図 2.5	ボイラーの構造	42
図 2.6	熱回収フロー	43
図 2.7	移動タンク貯蔵所接続配管からの漏洩（日本）	72
図 2.8	N a 試験装置のフリーズシール配管からの漏洩（日本）	72
図 2.9	N a 弁からの漏洩（日本）	73
図 2.10	中間熱交換器 N a 出入口二重管部の破損による N a の漏洩 （Phenix）	73
図 2.11	太陽熱発電の集光器とタンク間の N a 配管からの漏洩（ア ルメリア）	74
図 2.12	中間熱交換器二次系ドレン配管からの N a 漏洩（BN600）	74
図 2.13	蒸気発生器の応力腐食と水漏洩（Enrico Fermi）	75
図 3.1	化学的データ収集方法	95
図 3.2	N a - A l - O の 3 成分系状態図	96

第 1 章 緒言

液体金属は良好な熱伝達特性、実用温度での金属との共存性などから、たとえば、ナトリウム冷却の高速炉を初めとして熱・エネルギーの製造・利用機関においては優れた熱媒体物質として利用されているが、現在のところその用途は限られたものに留まっている。

液体金属、特にアルカリ金属は化学的活性に富み、エネルギーシステムが要求する温度においては、水（蒸気を含む）、空気、酸素、ハロゲン元素とは激しく反応し、その反応生成物は腐食性の高いものが多いのが特徴である。したがって、熱・エネルギー製造等の液体金属利用システムにおける一層の安全と信頼性を確立するためには、様々な分野の研究開発が必要とされるが、特に高温での材料との共存性と化学的挙動、液体金属自体の化学安定性に関わる研究開発が極めて重要となる。

（財）若狭湾エネルギー研究センターでは、平成 10 年度より液体金属の基礎化学調査研究に着手し、ナトリウムを中心に化学的挙動ならびに取り扱い技術について調査してきた。今年度はその第 2 年度として、国内外における液体金属の利用状況調査に基づく取り扱い技術の調査、文献検索による物性値の収集、更には種々の液体金属に関する安全性、事故例に関する実地を含む調査活動を実施した。

国内調査としては、九州地区における一般化学工場における安全対策と青森県にある亜鉛・鉛の精錬工場における液体金属の取り扱い技術の調査、また海外調査としては、ロシアにおける鉛、鉛・ビスマスの高速炉冷却材としての利用技術の調査、および英国における使用済みナトリウムの処理技術の調査を実施した。また、本年度は化学熱力学的データ等の物性値の抽出、収集の実施、更にそれらデータを集めてアブストラクト集作成を目指す活動をした。

これら研究を実施する方法と体制としては、昨年に引き続き基礎化学、化学工学、金属材料等の専門家およびナトリウム化学の研究に経験のある専門家の参加を得て、液体金属基礎化学調査研究委員会を組織して調査を実施した。

委員会の構成ならびに活動実績は表 1.1 と 1.2 に示すとおりである。以下に本年度の調査研究活動で得られた成果をまとめて示す。

表 1.1 液体金属の基礎化学調査研究委員会委員名簿

委員長	藤井靖彦	東京工業大学原子炉工学研究所所長
副委員長	荒川鐵太郎	元三菱化学株式会社常務取締役
副委員長	宮崎慶次	大阪大学大学院工学研究科教授
委員	青砥紀身	核燃料サイクル開発機構大洗工学センター ナトリウム安全工学試験部 機器構造安全工学グループリーダー
委員	菊地義弘	広島大学工学部第一類教授
委員	佐久間洋一	文部省核融合科学研究所助教授 (財)若狭湾エネルギー研究センター 主席客員研究員
委員	下屋敷重広	(株)日立製作所電力電機開発本部 主任研究員
委員	須佐匡裕	東京工業大学大学院理工学研究科 材料工学専攻助教授
委員	高橋 実	東京工業大学原子炉工学研究所助教授
委員	永田和宏	東京工業大学大学院理工学研究科 物質科学専攻教授
委員	埜田昭夫	(財)若狭湾エネルギー研究センター 主席客員研究員
委員	樋口治雄	日本曹達株式会社 研究・技術本部 生産企画管理部主席
委員	姫野嘉昭	核燃料サイクル開発機構敦賀本部 国際技術センター技術主席
委員	平山徹夫	ベシネー・ジャポン (株) 非鉄金属部次長
委員	富士川尚男	住友金属工業(株)総合技術研究所 専門部長
委員	堀池 寛	大阪大学大学院工学研究科 電子情報エネルギー工学専攻教授
委員	松村幸彦	東京大学環境安全研究センター助教授

委員 宮原信哉 核燃料サイクル開発機構大洗工学センター
 ナトリウム安全工学試験部プラント
 安全工学グループサブリーダー

事務局 (財)若狭湾エネルギー研究センター
 丸山忠司 主席研究員
 埜田昭夫 主席客員研究員
 佐久間洋一 主席客員研究員

表 1.2 液体金属の基礎化学調査研究委員会 活動記録

(第3回国内調査)

- ・日時：平成11年6月2日(水)～6月4日(金)
- ・場所：①三菱化学株式会社黒崎事業所 〒806-0021 北九州市八幡西区黒崎
- ・場所：②日鉱金属株式会社佐賀関製錬所 〒879-2201 大分県北海郡佐賀関町大字関
- ・場所：③旭化成工業株式会社薬品工場 〒882-0847 宮崎県延岡市旭町7-4319
- ④ // 東海工場 〒882-0015 宮崎県延岡市水尻町304
- ・出席者：荒川副委員長、菊地委員、永田委員、堀池委員、松村委員、下屋敷委員、宮原委員、樋口委員、富士川委員、青砥委員、平山委員、姫野委員、佐久間委員、埜田委員、榊原(サイクル機構)

(サブワーキング：化学研究会)

- ・日時：平成11年7月3日(土)
- ・場所：箱根ヴィラジャジャポーネ
- ・出席者：永田委員(主査)、富士川委員、青砥委員、姫野委員、佐久間委員、藤井委員長、荒川副委員長、埜田委員、丸山(事務局)、山田(サイクル機構)

(第4回調査研究委員会)

- ・日時：平成11年7月13日(火)
- ・場所：福井県若狭湾エネルギー研究センター
- ・出席者：藤井委員長、荒川副委員長、菊地委員、永田委員、松村委員、下屋敷委員、宮原委員、樋口委員、富士川委員、青砥委員、平山委員、須佐委員、姫野委員、佐久間委員、埜田委員、(サイクル機構)榊原、山田

(海外調査)

- ・日時：平成11年9月18日(土)～9月29日(水)
- ・場所：①Institute for Physics and Power Engineering(IPPE)
②Research and Development Institute of Power Engineering(RDIPE; ENTEK)
③OKBM Mechanical Engineering
④ロシア化学アカデミー
⑤UKAEA Dounreay
- ・出席者：永田委員(団長)、荒川副委員長、青砥委員、埜田委員(事務局)丸山、

(第5回調査研究委員会)

- ・日時：平成11年10月29日(金)
- ・場所：福井県若狭湾エネルギー研究センター
- ・出席者：藤井委員長、荒川副委員長、菊地委員、永田委員、下屋敷委員、宮原委員、樋口委員、富士川委員、青砥委員、平山委員、須佐委員、姫野委員、佐久間委員、埜田委員丸山(事務局)、榊原、山田(サイクル機構)

(第3回国内調査)

- ・日時：平成11年12月2日(木)
- ・場所：八戸製錬株式会社八戸製錬所 〒039-1161 青森県八戸市大字河原木字浜名谷地 76
- ・出席者：藤井委員長、荒川副委員長、下屋敷委員、宮原委員、樋口委員、埜田委員

(第6回調査研究委員会)

- ・日時：平成12年2月9日(水)
- ・場所：福井県若狭湾エネルギー研究センター
- ・出席者：藤井委員長、荒川副委員長、菊地主査、永田主査、松村委員、下屋敷委員、宮原委員、樋口委員、富士川委員、平山委員、須佐委員、佐久間委員、埜田委員丸山(事務局)、山田(サイクル機構)

第2章 利用技術調査研究

2.1 取り扱い技術の調査

液体金属を熱媒体として利用している例は、高速炉におけるナトリウムがよく知られているが、それ以外の利用例はさほど多くは見当たらない。しかしながら、ロシアにおいては鉛、鉛-ビスマスは原子炉の冷却材として早くから注目され、実際 1962 年には鉛-ビスマスを冷却材にした原子力潜水艦が作られ、1970 年代末までに合計 8 隻作られた実績がある。現在も、ロシアの研究所においては高速炉冷却材の有力候補として熱心に研究されている。また、日本においても亜鉛の製造において、溶融鉛を利用するいわゆる ISP (Imperial Smelting Process) 法を用いた製錬方法を実施している例がある。以下には、鉛および鉛・ビスマスの利用についての調査、溶融鉛を利用した亜鉛と鉛の精錬についての調査、および使用済みナトリウムの処理技術についての英国ドンレイサイトにおける調査結果を記す。

2.1.1 鉛および鉛-ビスマス冷却型高速炉に関する研究開発の動向

§ 1. はじめに

化学的活性が小さく、沸点がより高い液体金属である鉛および鉛-ビスマスを冷却材として用いる高速炉に関する研究開発の動向を調査したので以下に述べる。ここで行った調査範囲はつぎのようである。

① 検索に使用したキーワード：鉛-ビスマス or 鉛冷却材 and 高速炉

② データベース：

- ・ NUCLEN <http://sta-atm.jst.go.jp/jicst/NUC4.HTM> (科学技術振興事業団)
- ・ ATOMICA <http://atomica.rist.or.jp/> (高度情報科学技術研究機構)
- ・ 日本原子力学会予稿集：1990～1997 検索分野は新型炉
- ・ 国際会議論文集：FR'91, PHYSOR96, ICON-4(1996), GLOBAL'96 等

§ 2 . 歴史[1,2]

ロシアでは約 30 年の鉛-ビスマス(Pb-Bi)冷却原子力潜水艦の経験があり、150 炉・年の運転がおこなわれている実績がある。したがって、鉛および鉛-ビスマスを冷却材として用いる高速炉の開発に関しては、これを応用することが最も手近である。しかしながら、Bi が希少資源であること及びポロニウム(Po)などの放射化核種の生成の可能性があることから、ロシアでは Pb-Bi と特性が類似している Pb を冷却材に選択し、陸上炉として高速炉へ適用するための研究を 1985 年から開始している。

国内では、Pb を冷却材にした高速炉の設計研究は 1990 年代に入り東工大（関本教授）、日本原子力研究所において概念検討に着手している。また、Pb-Bi を 2 次系の冷却材に用いる直接接触伝熱型蒸気発生器の研究開発が電力中央研究所において行われている。

§ 3 . 鉛-ビスマスと鉛冷却材の特徴[1,2]

(1) 鉛-ビスマスと鉛冷却材の特徴

Pb-Bi と Pb および Na の物性値を比較すると次のようになる。

表 2.1 鉛・ビスマス、鉛およびナトリウム冷却材の特性
(出典：科学便覧)

	Pb-Bi (45.5%,55.5%)	Pb	Na
密度 (ton/m ³ ,800K)	10.3	10.4	0.83
比 熱 (kJ/kg K,800K)	0.146 125	0.16 327	1.3 98
融点 (°C)	1,670	1,737	882
沸点 (°C)	10.9	16.3	71
熱伝導度 (W/m・K)			

(2) メリットおよびデメリット

高速炉の安全性という観点から、冷却材に従来のナトリウムの代

わりに鉛-ビスマスや鉛を使用すると、以下のようなメリット・デメリットがある。

a) メリット

- ① 冷却材の沸点が高いため、ULOF 時等にボイドが発生する問題が少ない。
- ② 化学的に不活性であり、水や酸素とほとんど化学反応しない。
このため、Na-水反応に起因する、Na 扱い上の装置類（二次冷却ループなど）を削減できる。
- ③ 中性子スペクトルを硬く設定でき、高めの増殖比を達成できる。
また、硬いスペクトルを利用して、TRU の燃焼効果を増強できる。
- ④ ポンプの停止時に慣性流量を多く期待でき、高い自然循環能力が得られる。

まとめ：固有安全性の向上が期待できる。

b) デメリット

- ① 腐食性が強く構造材との共存性について不明部分あり。
- ② 比重が非常に大きいため、炉容器及びその支持構造の強度及び耐震性が要求される。
- ③ 密度が高くポンプの動力が大きくなる。
- ④ Bi は希少資源、Po などの放射化核種の生成の可能性がある[10]。
- ⑤ Pb は融点（327℃）が高く、凍結防止策が必要。

まとめ：運転時の課題が大きい

§ 4 . 研究開発の動向

(1) ロシア[1～3]

1952 年に物理エネルギー研究所（IPPE、オブニックス）で鉛-ビスマス冷却高速炉の設計を開始した。ここで原子力潜水艦の 30 年の経験、150 炉・年の運転経験がある。さらに、実験機械設計局ギドロプレス（OKB, "Gidropress"、ポドルスク）との共同で、他の分野へ適用するための設計研究を開始した。

・ Angstrom (6MWe, 12Gcal/hour) の設計

極地用、動力・核熱利用。原子炉機器 (ready-made unit)の輸送が簡単 (空、陸、川)

- ・ BRUS-150 (150MWt)

動力・核熱利用、石炭の液化、石油精錬、海水脱塩

- ・ BRUS-220 (220MWe, 750MWt) [6]

核兵器級 Pu, MA 燃焼への利用

一方、鉛冷却型の高速炉は 1985 年クルチャトフ研究所にて設計を開始。現在は、エネルギー技術研究所 (RDIPE, モスクワ) が中心になっている。原型炉 (BREST-300) から実用炉 (LFR-1000) までの設計と開発プログラムを作成した。

a) 炉心設計

- ・ 原型炉 BREST-300、電気出力 300MWe、窒化物混合燃料 (UN+PuN)、2 回路冷却型、新しいコンセプトとして蒸気発生器を原子炉の主タンク内に置く。BREST-300 のプラント概念図と炉心レイアウトを図 2.1 と図 2.2 に示す。炉心特性の仕様を表「もんじゅ」のそれと比較して表 2.2 に示す[8]。
- ・ 実用炉 LFR-1000、電気出力 1000MWe、窒化物混合燃料 (UN+PuN)、2 回路冷却型、2 次冷却系は無し。単位重量当たりの伝熱特性が Na より劣るため、1 次冷却材インベントリは 16,000 トンと Na 冷却高速炉の 10 倍以上になる。

b) 実験による検証

- ・ 1991～1992 年 BREST-300 を模擬して臨界実験
- ・ 鉛と炉材の両立性データ取得実験
原子炉容器は 4,000 時間で腐食量は $18\mu\text{m}$ 、蒸気発生器にフェライト鋼は使用できない。他の材料腐食データは $0.01\sim0.05\text{mm/y}$ 、被覆管 12,000 時間テストで腐食量は $45\sim75\mu\text{m}$

c) 開発研究課題

- ・ 高い溶解温度
- ・ 鉛の構造材料に対する侵食性
- ・ 機器の高温度化とそれに関連した運転と修理の諸問題
- ・ 熱伝導度が高くないこと

- ・原子炉内に重い冷却材が多量にあること、及びそれに関連して機器の荷重と強度の問題があり、特に振動の問題が避けられない。

(2)日本原子力研究所[3]

平成5年ごろまでに以下のような概念設計が報告されている。熱出力は1,500MWt、炉容器はタンク型で、金属燃料炉心および窒化物燃料炉心の両方について検討を進めている。炉容器材料はSUS316、被覆管はフェライト鋼(MA957)を使用するとしている。耐震性に関してはS2地震時での成立性について、炉容器直径13m、電気出力600MWe以下と仮定し、立地方式の検討を行っている。経済性については、ナトリウム冷却型高速炉に対するコスト比は約86%であると報告している。

(3)東工大(関本教授)

関本研では、新しい燃料や冷却材(鉛ビスマス、鉛、水銀)を用いた高速炉の概念設計研究が行われ、多くの研究発表がなされている[7]。最近ではロシアの研究所と研究協力を続け、懸念された腐食性については、ロシアで良い結果が出つつあると報告している[4]。

(4)電力中央研究所[5]

1次ナトリウムで加熱した低融点合金中(鉛ビスマス)に直接水を注入して蒸気を発生させる、直接接触伝熱型蒸気発生器(図2.3)を92年から研究開発が行われている。95年までに報告されている主な成果は、以下の通り。

a)低融点合金と水との直接接触伝熱特性

鉛ビスマスと水との直接接触伝熱実験を行い、蒸気発生器の大きさの推定に必要な伝熱特性を把握したところ、有効伝熱部の体積が従来型蒸気発生器の半分以下になる。また、蒸気爆発現象のような激しい沸騰現象が生じないことの確認がなされている。

b)伝熱管破損時のナトリウム-水反応に関する安全性

ナトリウムが流れる伝熱管が破損した場合は、蒸気発生器内の圧力の方がナトリウム系よりはるかに高いため、鉛ビスマスが伝

熱管内に流入する。このときの鉛ビスマスの蒸気発生器内降下速度は $1\sim 2\text{mm/s}$ であり、水蒸気泡の上昇速度 $20\sim 30\text{cm/s}$ に比べて十分に遅いので伝熱管と給水管の距離を適切にとることにより、水がナトリウム側に入ることはないとしている。

c) 低融点合金と構造材との共存性

高クロム鋼においては、腐食などの問題はないことが分かった。なお、今後の展開として、低融点合金と水との反応生成物（酸化鉛など）の量を抑制するための検討など、蒸気発生器の技術成立性の見通しを得ることとしている。

(5) 米国

ウエスティングハウス社にてポロニウムの放射化対策についての検討例あり[10]。

§ 5. まとめ

化学的活性が小さく、沸点がより高い Pb-Bi、Pb を冷却材として用いた鉛冷却型高速炉は、Na を冷却材として使用する現行の高速炉の問題点のかなりの部分を解決できる可能性があるが、材料の腐食や耐震性、凍結防止等の運転時の課題があり、今後もロシアを中心に関係各所からの技術情報を入手し検討・評価していく必要がある。

§ 6. 参考文献

- [1] 原産, ロシアの高速炉開発に関する調査報告書, 1997.3
- [2] 大杉・原研, ロシアにおける高速炉の先進的利用, 1998.3
- [3] 第 30 回原子動力研究会年会報告書, 1993
- [4] 関本研・東工大,
http://www.nr.titech.ac.jp/~hsekimoto/fission_energy.html, 1998.7
- [5] 電中研, 高速炉用の革新的蒸気発生器開発のための基礎試験, 1995
- [6] V. V. Chekunov et al.; " Calculated Evaluation of a

Possibility of Plutonium Utilization and of the Actinides Burning in the Lead-Bismuth-Cooled Fast Power Reactor", PHYSOR 96 D-41~46 Sept. 1996

- [7] H. Sekimoto and Z. Su'ud; "Design Study of Lead and Lead-Bismuth-Cooled Small Long-Life Nuclear Power Reactors using Metallic and Nitride Fuel", Nuclear Technology, vol.109 Mar. 1995
- [8] E. O. Adamov et al.; Progress in Lead-Cooled Fast Reactor Design.
- [9] E. O. Adamov et al.; Two Circuit Steam-Generating Facility with Fast Lead-Cooled Reactor, FR'91 P5.3
- [10] R. B. Tupper et al.; "Polonium Hazards Associated with Lead Bismuth use as a Reactor coolant", FR'91 P5.6

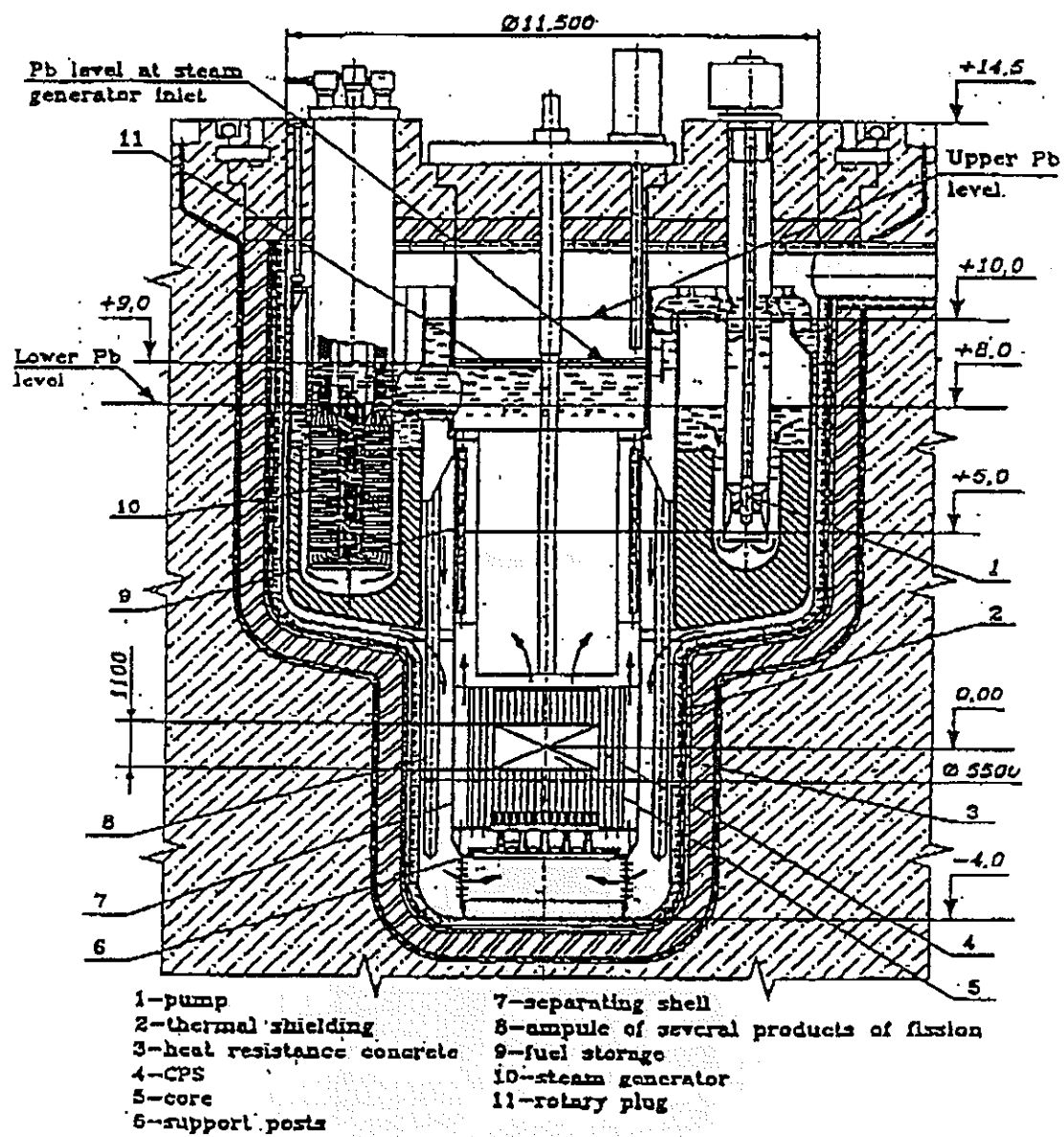


图2. 1 铅冷却高速炉BREST300

表2. 2 鉛冷却高速炉BREST 300の仕様

熱出力	700MWt
電気出力	300MWe
燃料集合体数	185体
炉心直径	2300mm
炉心高さ	1100mm
燃料集合体格子間隔	150mm
燃料要素間隔	13.6mm
燃料	UN+PuN
炉心燃料重量	16t
Pu/(²³⁹ Pu+ ²⁴¹ Pu)の重量	2.2t/1.6t
最大燃焼度	12%
燃料寿命	5~6年
燃料交換間隔	1~2年
増殖比	約1
炉心入口／出口鉛温度	420°C／540°C
蒸気発生器入口水温／出口蒸気温度	340°C／515°C
最高被覆管温度	650°C
最高鉛流速	1.8m/sec

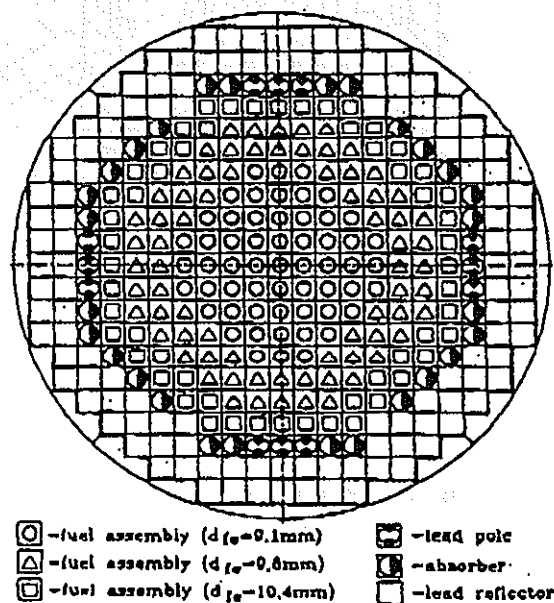
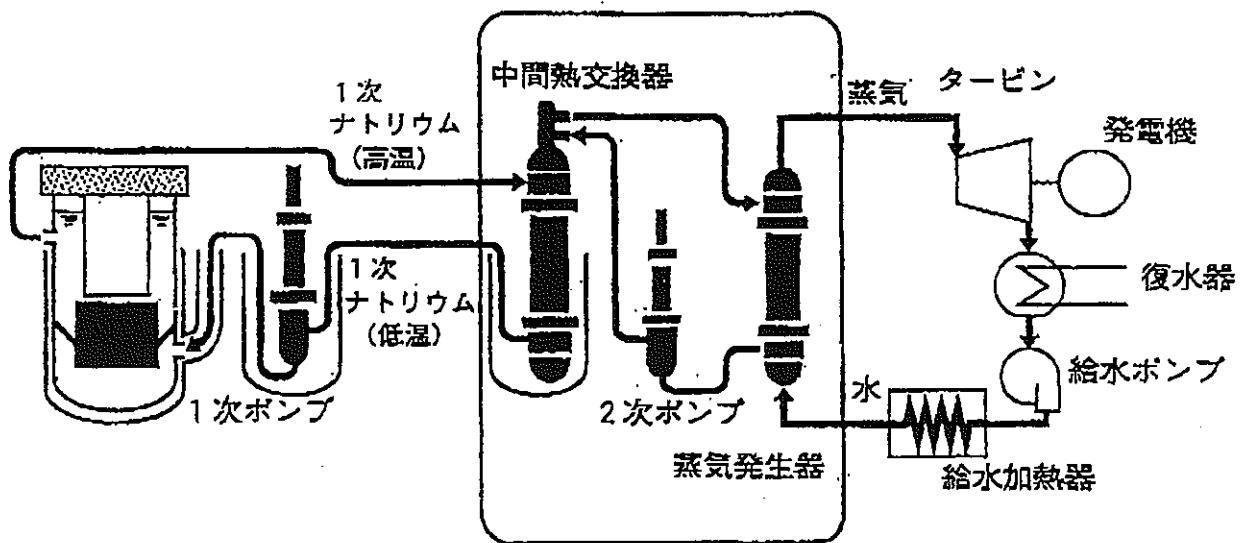
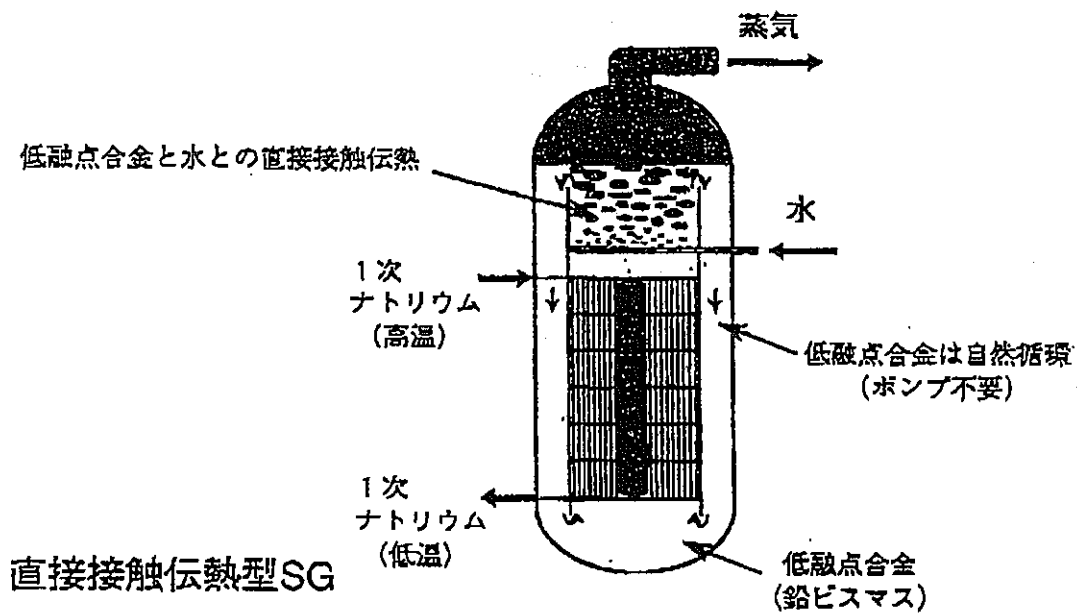


図2. 2 BREST 300炉心のレイアウト



従来型のシステム構成

○内を以下で置き換える。



直接接触伝熱型SG

図2. 3 従来型システム構成と直接接触伝熱型蒸気発生器

2.1.2 ロシアにおける鉛・鉛ビスマス利用技術の現状

§ 1. はじめに

ロシアにおける鉛(Pb)及び鉛-ビスマス(Pb-Bi)を中心とした重液体金属関連研究開発成果については、既に国内の複数機関が種々のレベルで情報交換、調査を行っている。なかでも、日本原子力産業会議は、文献収集及び公開資料分析、あるいは両国の専門家による情報交換(専門家会議)という形式で、平成9年よりほぼ毎年調査報告書を刊行している[1~4]。その調査活動の主眼は、高速炉の冷却材にこれら重金属を選択することによる安全性及び経済性向上の可能性に関する評価である。その中で、多くのロシア人研究者は、冷却材としてPb及びPb-Biを選択することで、固有安全性を持つ高速炉の実現が可能であると主張している。しかし、一方で、報告書中の数は少ないが、ナトリウム(Na)と比してそうした重液体金属が持つという優位性を否定する意見も含まれており、両者の主張の確認並びにその主張の論拠となる情報を収集することは重要である。

液体金属基礎化学研究調査委員会では、1999年9月18日から9月29日にかけてロシアの関連研究施設訪問並びに現地において専門家、第1線研究者らとの意見交換を行い、鉛(Pb)及び鉛-ビスマス(Pb-Bi)を中心に、重液体金属の利用技術に関する情報を収集した。訪問した機関ならびに対応窓口は以下の通りである。

Institute for Physics and Power Engineering(IPPE), Obninsk

訪問対応窓口：副所長 V.Chitaykin

Research and Development Institute of Power Engineering
(RDIPE;ENTEK), Moscow

訪問対応窓口：所 長 B.Gabaraev

ロシア科学アカデミー、モスクワ

OKBM Mechanical Engineering, Nizhni Novgorod

訪問対応窓口：第1副所長 V.I.Kostin

§ 2. 各訪問機関における講演内容及び収集情報概要

- (1) 物理エネルギー研究所(Institute for Physics and Power Engineering:IPPE)

主な研究所側出席者は、V.Chitaykin（副所長），V.M.Poplavsky（副所長），Y.I.Orlov, A.Y.Rusanov, G.I.Toshinsky, A.D.Efanov であり、Na 冷却炉研究者である V.M.Poplavsky を除くメンバは全員 Pb-Bi 冷却炉研究分野に所属している。IPPE は、モスクワ郊外のオブニンスクにあり、1946 年に設立されている。ロシア国内における液体金属冷却系の開発及び高速炉開発の指導的立場にあり、世界最初の原子力発電所が建設されていることでも有名である。これまでに、ナトリウム冷却高速炉、鉛ビスマス冷却炉、及び小型高温アルカリ金属冷却炉の開発を行っており、主要施設としては、世界最初の原子力発電所 RBMK(6,000 kWe)、高速実験炉 BR-10、臨界実験装置 BFS-1、BFS-2、及び KOBRA、熱物理実験室、宇宙用原子炉トバース試験施設、加速器研究室、核ポンプレーザ装置 BARS-6 等がある。

① IPPE における液体金属関連研究開発の概要紹介(V.Chitaykin)

IPPE は、ロシアにおけるあらゆる原子力関連の液体金属研究の中心である。また、液体金属研究は IPPE のレイボンスキから始まっている。開発の初期には、陸上原子炉については Na が、宇宙炉についてはナトリウム・カリウム(NaK)、ナトリウム・カリウム・セシウム(NaKCs)及びリチウム(Li)が選択された。船用炉の Pb-Bi を含め、選択の理由は明確ではないが、融点等熱物理学的な特性にあったようである。特に、船用炉用冷却材としての Pb-Bi は、炉自体をコンパクトにでき、出力を短時間に上げることが可能で、出航までの時間短縮が計れることが有利と考えられた。Pb-Bi を冷却材とした炉を搭載した潜水艦は 8 隻建造され、1954～1990 年まで就役した。IPPE では、この他、水銀(Hg)、ガリウム(Ga)及び錫(Sn)の利用技術開発も手掛けており、それらの知見やデータも有している。

② IPPE における Na 冷却型高速炉開発の概要(V.M.Poplavsky)

今回の日本側訪問団の主な関心が Pb-Bi にあるのは聞いているが、ロシアにおける地上型高速炉の基本的な戦略は日本同様 Na にある。実際これまでも、ロシアの高速炉の冷却材は、Na であり、この実用化のための研究には、1946 年以来約 1,200 万ドルを投入している。今後の計画においても、経済的な大型 Na 冷却型高速炉開発は継続し

ていく予定であり、当面 BN-600 における解体核燃焼技術開発、並びに BN-800 建設を推進する。

③ Pb-Bi 冷却技術の基本原則(Y.I.Orlov)

Pb-Bi を冷却材として選択した理由は、化学的安定性や沸点の高さ等の性状にある。課題といわれる材料腐食については、冷却材の純度管理と耐食材料開発によって克服している。米欧各国が選択した冷却材(Pb-Bi)中にインヒビタとしてジルコニウム+マグネシウム(Zr+Mg)等を添加し、構造材料表面に Zr 炭化物や窒化物を析出コーティングさせる技術開発は失敗に終わっている。我々は実験と熱力学評価により、Pb-Bi 中の酸素濃度管理により課題を解決した。Pb-Bi 中酸素濃度管理とは、カバーガス中の酸素濃度管理、及び系統バイパスに個体酸化物(PbO)を直接入れることにより酸素濃度を常に $10^{-7} \sim 10^{-5} \text{mass\%}$ に維持することである。この酸素レベルを維持することで材料表面の酸化保護層を安定化させることができる。酸素濃度計測は、新たに開発した $\text{ZrO} \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ 固体電解質系の計測器で実施している。

④ Pb-Bi 冷却における構造材料の問題点(A.Y.Rusanov)

構造材料の腐食についての対応は、

- ・ 冷却材酸素濃度制御
- ・ 構造材料組成（元素）
- ・ 水力／流体力学評価
- ・ 温度制御
- ・ 流体速度依存性

の観点から行った。オーステナイト系より高温で耐腐食性が優れるフェライト系鋼（純粋なフェライト鋼は最悪、推奨はフェライト-マルテンサイト鋼）が、Pb-Bi 冷却材の構造材料としてより適していると結論した。

耐食技術としては、Orlov が報告したように冷却材中の酸素濃度制御が最適だと結論している。材料表面に形成される酸化物層厚さは数 μm ～ 100 μm である。酸化物の組成は Fe 系であり、Fe-Cr ではない。後者の酸化物層は剥離し易く保護層にはなりにくい。

耐食材料開発は、保護層の形成と安定性の観点から、コーティング技術及び材料組成設計の両方から研究を行った。Pb-Bi との共存性実験の結果に基づき、基本材料はフェライト-マルテンサイト系鋼とした。当初、我々もコーティングを指向したが、Zr-Mg がだめであることは欧米で確認済みであり、我々の研究では Mo コーティングが最も良い成績を残している。しかし、最終的には酸素濃度制御による酸化物層形成を採用した。酸化物層の安定化のために、材料中に珪素(Si)を添加(例えば、12Cr-1.5Si-1Mo)している。浸漬実験後の観察によれば、Si 濃度分布と Fe 濃度分布は相反しており、Si 添加の効果は確認されている。形成した酸化物層の安定性は、燃料要素管について、既に 550℃で 12,000h の試験を終了しており、この条件で十分安定であることを確認している。酸化物層の成長は、基本的には放物線則に従うが、長時間側では飽和しているものと考えている。

⑤ 腐食試験施設見学(A.Y.Rusanov)

Pb-Bi 及び Pb 試験ループ、並びに酸素濃度計校正ループ及び解析室を見学した。現在の試験対象材料は、主にフェライト-マルテンサイト系の燃料要素管である。これまでの試験時間の最長は約 50,000h である。Pb-Bi ループはインベントリ 1.5ton、使用最高温度 600℃、流速 2.0m/s で運転されている。ループへのチャージはタンク内ガス圧により行っている。Pb-Bi 及び Pb ループのいずれも機械式ポンプを採用している。Pb ループには酸素及び水素注入部が備えられている。なお、ループ構造材料は Si 添加オーステナイト系鋼である。酸素濃度管理幅についての根拠説明に使用されている(酸素ポテンシャル) 電位-温度図は、 $\text{Bi} \mid \text{ZrO} \cdot \text{Y}_2\text{O}_3 \mid \text{Pb-Bi-O}$ 電池による実測値に基づいている。

⑥ 熱流体実験施設見学(Y.I.Orlov, A.D.Efanov 他)

これまで、地上炉用として Na、宇宙炉用として NaK 及び Li を研究している。Pb-Bi 及び Pb 技術開発にも指導的立場を担ってきた。最近、新たに Ga についての研究を開始している。現在最も力を入れているのが、Pb 冷却材の長所の根拠、利用手引き書の作成である。

既に一部ホームページに掲載中であり、参照できる。冷却材中のスラグ(多くはPbOやFe酸化物)除去のための特殊フィルタとシステムを開発している。フィルタは石綿が基本材質であるが表面に特殊湿布が施されている。スラグ除去システムはこのフィルタを重ねた部分と Al_2O_3 球充填部分から構成されている。また、酸素供給は PbO 球を詰めたカーゴを冷却材バイパス中に沈めることで行う。

(2) エネルギー技術研究所 (Research and Development Institute of Power Engineering: RDIPE/ENTEK)

研究所側の出席者は、V.Orlov(副所長), V.Smilnov, V.Leonov, V.Tsykunov, S.Bozin, Z.Emelyntsevaであった。RDIPEは、鉛冷却炉開発の中心であるが、原子力技術だけでなく、重金属を含む水質の浄化、放射能除染技術開発も行っており、ロシアで現在問題となっている退役原子力潜水艦処理についても指導的立場にある。

鉛冷却型高速炉(BREST)概念の提唱に関しては、多数の関連実験研究成果を報告している。炉心構造材に関する $620^{\circ}C$ 及び $650^{\circ}C$ の $1.6m/s$ 流速 Pb 中における 8,500h 耐久試験、構造材料に関する流速 $1.7m/s$ の $550^{\circ}C$ Pb 中における 12,500h の耐久試験を実施し、それぞれの材料における種々の要因が腐食に及ぼす効果を確認している。こうした試験結果から、Pb 冷却炉には Pb-Bi 技術が適用できることを確認している。なお、BREST の設計では、Pb 中の適正な溶存酸素は、重量比率で $5 \times 10^{-5} \% (0.5ppm)$ であると報告されている。

① RDIPE(ENTEK)における関連研究開発紹介(V.Orlov)

RDIPE では、液体金属に関する直接の実験研究は過去も現在も行っていない。専門的な機関、例えば IPPE において取得された試験データに基づき評価をしてきた。いわば、データの利用者である。液体金属に関する物性値を得ようとするのであれば、オブニンスク(IPPE)が相応しい。しかし、原子力分野において重液体金属を含め、液体金属の冷却材応用研究、適用性技術を指導しているのは RDIPE である。結論的に言って、原子力が今後も発展するためには、冷却材に液体金属を用いることが必須条件である。RDIPE は 1947 年に

Dollezhal によって創立され、軍事プルトニウム(Pu)生産炉及び潜水艦用炉開発の拠点となった。RDMK 型黒鉛炉も開発し、核爆弾生産を行ってきた。同時に液体金属を利用するための装置、道具、及び技術開発も実施してきた。しかし、現在では、IPPE とともに米国とも積極的な国際研究協力を行っている。

② 原子力開発の将来展望(V.Orlov)

我々は種々の炉を開発してきた。黒鉛、軽水、重水、そして液体金属冷却炉である。1959 年最初の Na 冷却炉 BR-5 を作った。そのころ米国は NaK による高速炉を模索していた。その後、我々は BN-350 及び BN-600 と順調に開発を重ねたが、米国は Pu 不拡散のため政治的にモラトリアムに転じた。

欧米各国は、その後、理由はともかく高速炉開発にほぼ挫折した。アジア諸国は、欧米の開発に追従しており、その開発内容は欧米の繰返しに過ぎない。日本を含め、その戦略には新しいものはなく、欧米路線が成功するとは思えない。高速炉は原子力発電の究極のシステムであるが、欧米の模倣に過ぎない日本が特別な技術や戦略を持たない限り挫折することは自明である。個人的には、現在の日本の原子力開発戦略は、再処理を含め、全く理解できないものである。増殖、再処理とも不要であると思う。高速炉と軽水炉は共存しうる。熱中性子炉はロシアでは局所熱供給設備として活路を見出せばよい。

高速炉開発についての基本戦略を見直すべきである。我々は、高速炉の優位性を認識しつつ、その課題、核不拡散性、炉の固有安全性、経済性を格段に改善することで導入シナリオを策定した。

次世代における枢要エネルギー供給システムは種々の観点（地球温暖化抑制、資源枯渇、化石燃料供給地域の政情不安等）から、原子力であることは自明である。しかし、発見及び推定埋蔵ウラン量（前者を 300-400 万 ton、後者を 1,000 万 ton レベルと推算）を考慮すれば、Pu を活用する高速炉の導入も、また、不可欠である。この場合、部分的な Pu 利用方策であるプルサーマル(Mox 燃料利用)は最終的な解決策とはならない。しかし、その利用戦略は核燃料サイクルから Pu 持ち出しを困難にすべきものでなくてはならない。我々は高速炉ブランケットにおける Pu 生産を考えていない。増殖比は 1.0

を保てばよく、Pu 取り出しのための大規模な再処理設備は不要である。また、シビア・アクシデントを決定論的に排除し（確率論は大衆に対して説得力を持たない）、基本的に不燃性の冷却材利用を志向する。さらに、放射性廃棄物の過半を高速炉内で消費する概念を示した。21 世紀へ向けた基本戦略概念は、以下のようにまとめられる。

- ・ 究極の Pu 利用（但し、その生産は炉心燃料中でのみ行う。新燃料については基本的に Pu 取り出しはせず、随時 ^{238}U を少量加えていく方策を採用）
- ・ ウラン(U)の消費は極力抑制
- ・ 固有安全炉の実現
- ・ 冷却材（熱媒体）は不燃
- ・ 高放射性元素を炉内で消滅

これらを我々は潜水艦用に開発した重液体金属型高速炉を基本として達成するシナリオを提案している。

その中心となるのは、Pb 冷却型高速炉である。炉は独自の鋼製炉容器を持たず、耐熱強化コンクリートで囲う。コンクリート容器は空気冷却孔を有しており、炉心は万一の場合も自然循環によって崩壊熱除去機能を維持する。燃料は窒化物である。

③ 鉛の耐食関連研究成果(Z.Emelyntseva)

Pb 冷却炉で問題となる腐食については、冷却材中の酸素濃度制御と材料開発によって解決した。ここでは材料開発について報告する。Pb 中に種々の材料を浸漬した試験結果に基づき、基本的な材質としてはフェライト-マルテンサイト鋼とした（炉心材料）。11~13%Cr 材により確認したが、Si あるいはシリカ(SiO_2)を添加することで強固な酸化保護層が材料表面に形成されることが明らかとなった。酸化層はスピネル型であり表層より Fe_3O_4 層、Cr 含有 Fe 酸化層、Cr 酸化層の構成となっており、Fe-Cr-O 層下に SiO_2 薄層(5~6 μm)が認められた。また、Cr 富化層が形成されることによる Cr 欠乏層も母相中に観察されている。こうした実験結果に基づき、冷却材中の最適な酸素濃度値が求められ、 $10^{-7}\sim 10^{-5}\text{mass\%}$ 範囲に維持することを

決定した。

④ 鉛関係の基礎物理化学特性(S.Bozin)

鉛中の元素の溶解度、挙動について明らかにした。これまでに、50 元素について試験データを取得しており、純度管理に反映している。特に、主要構造材料構成元素、Mo, Fe, Cr, Ni, Co, Mn, Zr, Ti、及び主要な軽元素、O, H, N, C についてのデータに関し、結果を定性的にまとめれば、概略以下のようなものである。

- ・鉛中の溶解度は極低い：Mo, Fe, Cr, Co
- ・鉛中の溶解度は高い：Ni, Mn、中間層や固溶体は形成しない。
- ・Zr, Ti についてのデータは未整備である。
- ・Si は鉛に溶解しない。
- ・酸素(O)については、未だ、状態図とも明確になっていない。
- ・炭素(C)は、酸素濃度に依存する。黒鉛へは鉛はよく浸透する。
- ・窒素(N)及び水素(H)はともに鉛に難溶であり、安定度の高い化合物は形成しない。

こうした研究の幾つかは、米国アルゴンヌ研究所からの委託である。もし、日本から要請があれば、こうしたデータ提供を含む協力をする用意はある。また、強化耐熱コンクリート成分元素についてもデータ整備中であり、構成元素-PbO 状態図として整理する予定である。Pb を含むこうした熱物理・化学特性データの多くはモスクワの高温研究所で取得されたものである。

⑤ 決定論による安全評価(V.Smilnov)

ここで対象としている炉は、BREST-300 であり、以下を達成させることである。すなわち、

- ・人的失敗、機器の故障及び外的要因による全ての事故（テロ行為も含む）、並びにこれらの複合事象について、基本的に炉からの放射性物質の放出がない
- ・事故を全て排除するのではなく、いわゆる過酷事故に至らない
- ・アクチノイド元素は炉内で消滅可能で、最終廃棄物の放射能レベルは採鉱時レベルと同等である
- ・1kw 出力当たりの U 消費を抑制できる

- ・総費用は、PWR 並かあるいは火力発電所並である

BREST-300 が「固有安全炉」と言えるパフォーマンスを有していることを確率論に頼ることなく示すことができた。すなわち、TOPWS（反応度挿入事故）、LOFWS（流量喪失事故）、LOHSWS（2次系ポンプトリップによる除熱源喪失事故）、OVCWS（鉛過冷却）並びに以上の事象の組み合わせについて、燃料表面温度が 800℃を数十分間超えることを健全性喪失の目安とした評価を実施したところ、全ケースで炉心の健全性は保たれることが確認できた。

炉心における冷却材あるいはスラグによる流路閉塞を無くするため、ダクトレス集合体採用、及び燃料ピン径を中心で小さくする（中心域： $\phi=9.1\text{mm}$ 、中間層： $\phi=9.6\text{mm}$ 、周辺域： $\phi=10.4\text{mm}$ ）等の工夫で流路面積を広く確保している。燃料ピン径を変えることで Pu 増殖も均一化している。制御棒はない。炉心周辺に Pb 案内管（専用チャンネル）が装備されており、チャンネル内ガス圧変化により下部から Pb が流入し必要な液面を保つことで炉停止・制御を行う。

(3) ロシア科学アカデミー

ロシア側出席者は、高温研究所の D.N.Kagan、モスクワ大学の L.Blagonravov 及び V.Rosthupkin、クルチャコフ原子力エネルギー研究所支所(TRINITI)の V.Alexeev であった。

① D.N.Kagan の研究紹介

本日は、科学アカデミー所属研究所の研究者が集まった。ロシアの液体金属研究は世界最高レベルであると自負している。データの多くは公式に入手可能である。そのうちの幾つかは既にインターネットでも紹介されている。種々のケースで、各研究所はグループで課題解決を計ってきた。既に訪問したという IPPE には偉大な研究者が多く、複数の成果が論文となっている。我々も国際会議などで、日本の鉄鋼協会等の関連研究は把握している。ロシア国内ではエカテリンブルク等のウラル地方にも関連研究所が存在する。液体金属に関して発行している図書例を紹介する。

"Liquid Metal Coolants for Heat Pipes and Power Plants",
Edt.V.A.Kirillin (1990). Hemisphere Pub. Co., (New York) ISBN
0-89116-303-4

この図書は簡単に入手でき、多数の有用なデータが含まれている。
あなた方の活動に役立つものと思う。多くの成果は国際交流を視野
に入れてロシア語及び英語版で報告書を発刊している。また、他に
多くの雑誌に成果を発表している。データの信頼性や客観評価も得
ており、私のデータは全てロシア GSSSD 国立標準データサービス及
び CODATA に登録している。

② V.Alexeev の研究紹介

パルス式分析装置による液体金属特性 (6,000°C までのプラズマ)
を研究しており、国際核熱融合炉計画(ITER)に参加している。高温
パイロメータを開発して実用化している。対象元素は、Li、アルミ
ニウム(Al)、他に炭素やベリリウムの耐食についても評価を行って
いる。液体金属の分散 (1~10 μm あるいはサブミクロンの粒子を酸
化性の媒体や還元性媒体へ分散させる、それにより、例えば、タン
グステン単体の形成を行っている)、化合物の生成関連化学特性、侵
食、ガス飽和についても研究分野である。液体金属の材料表面フィ
ルム形成 (金属自身、及び金属化合物) の研究も行っている。その
他に、宇宙埃 (200km/s 以上の速度を有する) の評価、液体状態に
おける埋設環境評価 (廃棄物の地中挙動を想定)、自己閉鎖性、超伝
導物質も研究対象としている。非平衡システム研究対象は低温だけ
ではなく高温状態も範疇に入れている (低温状態では、アモルファ
ス)。

③ L.Blagonravov の研究紹介

所属講座は分子化学、液体と固体の熱物理的な研究に携わってい
る。アルカリ金属については 20 年前から研究を行っている。同講
座には複数の著名な研究者がいる。多分、世界でも初めて水銀とア
ルカリ土類金属との臨界点計測を行ったと自負している。液体金属

の熱容量について、高温高压下での測定手法を開発した。これらは Alexeev と協力して行っている。対象には、あなた方が興味を持っている Na や K も含まれている。熱物理学的な特性評価のための手法も確立した。一定圧下でのエントロピーの計測も実施した。現在、新たな、熱膨張率の計測方法を開発中である。従来の手法では体積変化や一定容量からの漏れ量を測定するが、それではある温度範囲の平均熱膨張率しか測れない。そこで、直接測定手法を開発している。成功すれば、0.1 あるいは 0.01°C 程度の温度変動についても計測可能となる。基本原理は試料に与える圧力を微小変化させて、その時の電気信号を得るというもの。既に、幾つかの成果を論文として公表している。

④ V. Rosthupkin の研究紹介

高温パイロメータを開発した。3つの波長を応用した計測である。これにより、先ほど議論があった表面放射率データ(emissivity)の必要性を回避した。原理は、線形3方程式による解を計測値とし得るというものである。この技術により種々の金属の融点を誤差1%以下で計測可能である。パイロメータ開発者のうち一人はイスラエルで会社を設立して工業化している。すなわち、購入可能である。専門的には、熱物理的特性評価を研究対象(エンタルピー、音速、減衰率等)としている。ナトリウム、カリウム、ガリウム、インジウム(In)、錫やアルミニウム及びその合金の特性評価を行っている。興味を持つであろう分野としては、アコースティックエミッションによる腐食層計測及び耐食技術開発にも携わっている。鉄鋼の硫黄による腐食についても研究対象である。

(4) 実験機械製造設計局(OKB Mechanical Engineering)

ロシア側出席者は、B. A. Vasilyev, V. Y. Sedakov (Na の専門家)、G. M. Antonovsky (流体解析)、B. P. Klyukov (液体金属全般)、Y. K. Panov (水)、N. G. Kuzavkov (液体金属&ガス)、V. Sysuev (Pb-Bi ポンプ設計)、I. Shmelyov (国際交流副部長)であった。OKBM は、ニジニノブゴロド市(旧ゴーリキ)にあり、1947

年に設立された。設立当初は、軍用プルトニウム生産黒鉛炉及びウラン濃縮ガス拡散プラントの開発を行った。その後船用炉の開発を行い、世界最初の原子力砕氷船搭載原子炉(PWR)の設計を行った(レーニン：45年間就役、アラスカ：20年間就役中)。BN-350、BN-600及びBN-800の開発にも中心的な役割を果たした。モジュール型高速炉 BMN-170、改良型高速炉 BN-600M、大型高速炉 BN-1600 を開発中である。1970年代に開発した熱供給専用安全性改良型炉 AST-500 (LWR) は建設されたが、住民の反対により運転には至らなかった。主要な実験施設は、コールド及びホット試験用臨界試験設備、熱物理試験用ループ、流量計測設備、バルブ試験設備、シール試験設備、及び水-水熱交換器用試験設備等である。

① OKBM 概要紹介 (Vasilyev)

今回の日本側の来訪目的が、重液体金属の取扱いについての情報収集であることは理解した。しかし、重液体金属についての研究開発はここでは現在行っていない。過去に行った研究成果についての情報量は多い。多くの所属研究者が Pb-Bi 及び Pb 冷却による炉設計に永年参画してきた。こうした重金属が炉の冷却材として利用できるか否かについての OKBM の考えを伝えることができる。OKBM では、単なる設計だけではなく、実際に併設工場による生産も行っている。だから、現実的な選択や評価に関する情報を提供できると思う。主要な活動であるシステム設計は多方面にわたっている。中でも経験豊富な領域は、船舶用原子炉である。ガス(He)冷却炉の開発も最近手掛けている。

② Pb-Bi 冷却炉用機器装置の開発、運用のための実験 (G.M.Antonovsky)

この材料には、密度が大、熱容量が小、強腐食性の欠点がある。そこで幾つかの確認実験を行った。各装置毎に多くの実験装置、試験体を開発した。実験は共同でソビエト時代の他の研究施設でも行われた。しばらく実炉を運転した後、取得データに基づいて改良を行った。主要機器の開発、材料に対する高腐食性が問題となった。さらに、非常に還元しにくい固体酸化物の生成が問題となった。こ

の冷却材を適用するには、それまで蓄積した熱媒体に関する技術を厳密に守らなければならない、ということが明らかになった。耐食及び酸化物除去方法開発、炉容器の冷却材が凍結してしまった場合の対応評価を行い、並行して Pb-Bi では構造材料選定が困難となったため、材料開発実験を行った。併せて必要な鋳造、圧延、溶接技術開発を行った。また、入り口ノズルの設計評価、炉容器加熱システム開発を行った。種々の実験の結果、常に Pb-Bi 融点以上の温度確保が必要であることが明らかになった。凍結冷却材が存在する直管の溶融実験では、2 から 3 回で試験体が破壊した。蒸気発生器(SG)については、分離型(蒸発機と過熱機)を指向したが、連絡管(U字管)の侵食と流力振動(速さ: 3.5m/s)が問題となった。同部は 1,050h の試験後破損した。最も振動の厳しい箇所での破損だった。主循環ポンプ、タービンの羽根で侵食(erosion)が認められた。そこで羽の角度を変え、厚みを増やした。こうしたことから、タービンの設計に厳格さ必要となった。シャフトシーリングの強度確認を目的に凍結試験を行った。シーリングは破れ冷却材漏れを起こした。そのため、漏れ許容設計とした。腐食については、ノズル隔壁が破損した、原因は侵食である。原子炉について、炉上部構造(プラグ)から漏えいした。追加の冷却システムを設けたことで、課題を解決した。SG では 2 次系(水)に破損が認められた。1 次系ポンプは、冷却材との比重の差が大であることに起因してガス運転中に破損した。結論的には、実用とした原子炉では、大きな故障は発生しなかった。そのため、放射化された装置交換の経験は皆無である。しかし、大きな故障が発生しなかった原因は、システムの成熟にあるのではなく、運転モードが常に定格未満(流速 3.5m/s、出力 20%、温度も出力とおなじ)であったためと考えている。従って、これらの結果は、陸上の商用炉開発には役に立たない。運転時間も、問題にならないほど短い。全体のパフォーマンスの評価は、加圧水型に劣ると結論した。また、燃料交換の経験はない。原子炉を解放したら、冷却材の品質を維持できないと考えられた。そうしたことから、炉のメンテナンス性は悪い。システムを構成する装置の温度を高温に維持しなければならないことは、作業員の環境としてはよくない。重金属冷却炉の最大長所とされる「固有安全性」も、結局のところ

PWR 並みには安全系を付けなくてはならない。長時間実用に供することが可能な構造材料は未だない。ロシアでも、原子炉の基準は厳しくなっており、基準を満たすためには金と時間が必要であるというのが結論である。

③ 専用 1 次系ポンプの設計・製作 (Sysuev)

1 次系メカニカル・ポンプの設計、製作について、製作図の説明が行われた。幾つかのシーリング機能を有している理由は、漏えい防止のためであるが、ひどく複雑なポンプとなった。タービンの材質は、オーステナイトステンレス鋼（耐食効果を考慮した改良材）である。回転や冷却材流のために、防食のための酸化被膜が壊れた経験はない。しかし、キャビテーションによる減肉はあった。

④ 液体金属取扱い技術、その未来 (Klyukov)

我々は、実際装置を作る前に種々の実験を行っている。この 40 年間複数の有望な液体金属を扱ってきた、Na、Pb-Bi、Pb-Sn、NaK である。例えば、BN-350 のフルスケール試験も定格流量で実施している。Na との取扱い差はないことを確認後、水を模擬流体とした。当初は、Na 及び NaK について取り扱ったが、1970 年代からは、Pb-Bi についても研究開発を開始した。以下では簡単に Na と Pb-Bi の比較を行う。

試験を行う場合の重要なことは、純度管理である。酸素濃度、及び他の不純物濃度の管理である。Na の場合は、コールド・トラップ (C/T) 及び専用フィルタで実施するのが一般的である。Pb-Bi の純度維持システムには、化学的な除去方法が採用された。それは水素の注入である。

密度が低いことから、Na では侵食 (erosion) は見られない。Pb-Bi ではエルボ部等で侵食による質量欠損が生じた。そこで、流速をおとすか、材料自身を変える必要があった。

最も困難であったのは、系統を解放する場合、装置交換や修理の場合、あるいは配管切断のケースである。Na の場合はコールドの状態で作業する。この場合、種々の狭隘な隙間に Na 入っても問題とならない。Pb-Bi では高温での作業（凍結、固体にしては作業するこ

とができない) となり、Ar ガス養生しても、大気の影響をまぬがれない(酸化物が生成する)。さらに、修理後の試験体組み立て自身が困難である。作業後の純化は、Na の場合 C/T で簡単にできる。Pb-Bi では、そのまねは不可能である。酸化物還元のために、水素の注入あるいは NH_4OH 注入が必要となる。また、Na の洗浄は水もしくは蒸気で可能である。水を用いた真空処理(OKBM の開発)の技術でも簡単にかつ安全に行うことができる。Pb-Bi 洗浄は唯一酸洗い(亜硝酸)しかない。

通常、熱媒体としてのパラメータ計測は、系内の圧力、流量、及び液面を測る。Na の場合は、全て電磁技術に拠っている。Pb-Bi では、複雑な測定システムが必要となった。通常の計器を使用するためには、計器保護のためガスを満たした容器が必要であった。Pb-Bi では含浸が生じ、接触抵抗が悪くなるため、そのまま通常計器は使用できない。

さらに、Pb-Bi, Pb 蒸気は人体に悪く、換気システムが必須となる。労働安全衛生法に基づけば、作業性(通訳は就労率といった)は 25% 減ずる。

良い面は、漏えい時には不燃であるという点のみである。

すべての弁にはシーリングが必要で、系統には予熱系が必須、ガス系にも加熱が必要、また、カバーガス(Ar)は 5ppm 酸素濃度以下に維持されなければならない。

⑤ Pb-Bi 冷却型炉に関する課題、技術開発及び解決策(N.G.Kuzavkov)

冒頭の挨拶に言ったように、原子炉の冷却材に Pb 系を使用することについて、ロシア OKBM の公式見解というのではないが、永年開発に携わった専門家としての見解を述べておきたい。冷却材の選択は、原子炉に大きな影響を与える。Pb の特性における根本的なデメリットは 5 つある。〔1〕熱物理学的な特性があまりよくない、〔2〕融点が高い、〔3〕侵食が起こり易い、〔4〕腐食が起こり易い(侵食とは原子炉へ与える効果が異なる)、〔5〕密度が高い、ことである。こうした特性の悪さが、原子炉構造やメンテナンス性等へ与える負の効果について留意しなければならない。以下の論理はいずれも Na との比

較である。

〔1〕熱物理学的な特性の悪さについて

炉構造的には大きな差は生まれない。しかし、燃料表面温度に合わせた蒸気条件が決めにくい。2次系を残したら、蒸気発生箇所が温度が低くなり過ぎる。BREST-300では2次系を削除し、蒸気発生器を1次系に組み込んだ設計を採用せざるを得なくなった。工学的にはこれはデメリットである。基本設計思想として、炉心近傍に圧力系を配置すること自体よいことではない。

〔2〕融点が高い

すべての運転モードで温度が高く設定されることになる。さもないと、設備取替え時における冷却材凍結の恐れが回避できない。予熱系のレベルは400℃程度となる。Na冷却炉であるBN600規模で200℃予熱を維持するのに大変だった経験からは、Pb冷却炉の実用規模プラントでは予熱系の設計や配置が極めて困難なものとなると考える。

これまでの制御棒、及びそのシステムは使えない。全く新しい概念が必要となる。BREST-300の概念では、空洞管に鉛自身を導入する。しかし、そのシステムでは故障時に修理が困難である。また、液面による位置決めもしにくい。

〔3〕侵食が発生し易い

侵食を抑制するためには、冷却材の流速を下げることになる。Pbの熱容量の悪い点が際立ってしまう。そのため、炉心径を大きくしなければならず増殖比が稼げない。

〔4〕腐食が発生し易い

Pb冷却炉推奨者は、酸素濃度管理により解決したと言っている。しかし、その純度管理は非常に厳しい。特に、酸素濃度の一定レベル維持がむずかしい。非常に生成し易いPbO抑制との兼ね合いが難しい。根本的な解決が図られたとは思えない。Pb冷却炉を推す研究者達は、以上の課題の大半を解決したとしている。しかし、それは小型炉でうまくいったというべきで、商用の大型炉では分らない。系が小さければ、酸素管理や水素注入はうまくいっても、600～1,000m³を超える大型プラントに対する保証はない。温度分布すらうまくとれない可能性がある。水素注入法は多分適用

できないだろう。侵食抑制のため、流速を小さくすれば、水素注入による還元そのものがうまくいかないことが考えられる。Pb系冷却炉の場合、特に、サイズ効果はやってみなければ不明である。

〔5〕密度が高い

地震による慣性力で炉が壊れる可能性がある。BREST-300の炉容器総重量は7,500tonであり、そのうち冷却材分は6,000tonである。BN-600では、4,500ton中750tonが冷却材分であることを考えれば違いが分かる。その場合、固有安全性は破れ、反応度は正に入る。

そのうえ、Naと比較すると、コスト的に改善されない。Pb及びPb-Bi用機器の寿命は数年を超えない。例え、これまで同様に定格未満の運転であっても機器の寿命は長くない。Pb凍結問題は解決されたわけではない。よく主張される苛酷事故についても、大きなメリットはないと言える。なぜなら、想定としての炉心破壊ストーリー上は冷却材の種類は関係がない。ソースタームは必ず外部放出が条件となる。沸点が高すぎることはメリットではない、Naの沸点程度が最適である。どうしても固有の安全性と呼ばれる原子炉はない。また、原子炉は燃料サイクルの一部にすぎない。輸送や再処理には冷却材は影響しない。Pb原子炉は設計できるが、安全上、経済性上、メリットは見いだせない。設計屋としては、賛成できかねる。

⑥ OKBM専門家の見解総括(B.A.Vasilyev)

我々はPb系冷却材の実現はうまく行かないと考え得る。Naの原子炉に比較して何も新しいものはない。増殖という観点からは、PbはNaに比較してだめだ。安全性にも疑問がある。

Naの欠点は、放射性1次系Naが漏えいしたら燃える恐れがあることだが、1次系は漏れない、あるいは燃えない設計となっている。軽水炉の1次系もほぼ漏えい事故原因を克服しつつある。これまでのケースから、Na漏えいの原因が決定的な設計ミスであったことはない。Pb冷却型原子炉の実現には、まずは、Na冷却型原子炉との徹底した比較が必要である。構造材料の開発についても、同様である。

(半永久構造物を想定した場合)材料の課題は全く解決していない。これらの意見は Na 開発技術者のみではなく、かつて Pb 関連研究に携わった研究者も同意見である。BREST-300 のように蒸気発生器を 1 次系に入れば、高圧の管の破壊により、周辺機器は大変な損傷を受けるだろう。概念検討自身がよくない。

冷却材には現状無欠の媒体はない。デメリットとメリットは相互にあるが、高速炉対象の冷却材としては Na が最適であると考ええる。構造上や幾何学的な対処により、1 次系からの漏えいを排除し、2 次系からの漏えいを最小限化することができるはずである。Pb の見極めに、サイズ効果の結論を得るために実際に大きな炉、システムを作る必要があること、それ自身が本当に不利な点であると思う。

§ 3 . ロシアにおける重液体金属利用研究開発の現状について

訪問前に予想された通り、ロシアにおけるナトリウム以外の液体金属、特に、重液体金属を高速炉の冷却材に適用する技術開発については、世界で最も進んでいる。また、実用を含む重液体金属取扱い経験についても、最も永く、深いと言ってよく、IPPE をはじめとするロシア研究機関へ、米国、仏国、独国及びイタリアの諸機関が、Pb-Bi 及び Pb に関する多数の研究委託を行なっている事実は、この認識が欧米においても共通したものであることを示している。一方、ロシアのこの研究開発分野は慢性的な資金不足にあり、新たな設備建設は、少なくとも今回訪問機関では認められず、既設試験装置の多くも十分なメンテナンスや更新ができない様子が窺われた。また、重液体金属冷却炉開発の次ステップとなるはずの、鉛冷却高速炉(LCFR)の建設[5]も Pb-Bi 冷却実用炉(CBEP-75)建設[6]も進んでいないようであった。

今回の訪問調査からは、ロシアにおける液体金属冷却型高速炉開発は、Pb-Bi 冷却型炉を IPPE とギドロプレスが、Pb 冷却型炉を RDIPE が (V.Orlov の発言からは、ロスエネルゴアトムが加担している可能性はある)、従来路線、すなわち Na 冷却型炉を OKBM 及び IPPE の一部 (Y.E.Bagdassarov[2] や今回の打ち合わせに参加した V.M.Poplavsky ら) が中心的な役割を担って進めているものと思わ

れた。

各機関訪問時の推奨冷却材に関する報告及び相互に批判・評価した発言内容を、各冷却材高速炉の特徴（長所）と問題点・課題（短所）に整理して以下にまとめる。

(a) Pb-Bi 冷却型高速炉

長所：①潜水艦用炉としての実用実績（8 隻）がある

②コンパクト設計、及び出力までの時間を短縮できる（潜水艦搭載炉として採用された理由でもある）

③冷却材としての不燃性

短所：①放射性 Po 同位体の生成

②Bi 自体の生産量（経済性）

以上は、鉛冷却型高速炉推進者(RDIPE)が指摘した「短所」についてのみを記載した。他の指摘は基本的に Pb と共通であるので、Pb に関する記述を参照されたい。

長所①に挙げた「実績」については、既述したように OKBM 研究者からかなり明確な反論がある。すなわち、Pb-Bi 冷却型潜水艦炉には、保守・補修及び燃料交換の一切の経験がないため、利用「実績」とは言えないというものである。稼働中に大きな事故に遭遇しなかったのも、この炉が定格運転（流量、出力とも）を一度も経験しなかったからで、潜水艦搭載によって、その実用性や安全性が確かめられた「実績」にはなっていないとの指摘である。IPPE 研究者も「実戦配備 7 隻が修理等のための母港を持たなかったこと」を認めており、RDIPE でもこの型の潜水艦が普及しなかった理由として保修専用港が無かったことが原因としている。

こうした事実や情報から、先行するロシアにおいてさえ Pb-Bi 利用技術は完成されているわけではなく、未だ実用には多くの課題を残していると判断する。

(b) Pb 冷却型高速炉

長所：

①固有安全性（高沸点による裕度確保、高密度による再臨界排除

等)の成立

- ②窒化物燃料、コロケーション、乾式再処理、運転中燃料交換等の採用による Pu 不拡散性確保、高レベル廃棄物生成排除を達成可能

短所：

- ①熱物理学的な特性の悪さ：燃料表面温度に合わせた蒸気条件が決めにくい
- ②融点が高い：設備取替え時に冷却材凍結の恐れ
- ③侵食が発生し易い
- ④腐食が発生し易い
- ⑤密度が高い：地震による慣性力で炉が壊れる恐れ
- ⑥増殖が困難

鉛(Pb)冷却型炉を推す研究者に最も強調される長所①であるが、OKBMの専門家からは、彼らの都合の良いストーリーは現在のロシアにおける安全評価基準からも許容されない、との見解が出されていることには留意すべきである。短所③は、本来密度が高い流体については考慮すべき観点であるにも関わらず、短所④に対する注目度からか、これまでの議論ではあまり問題とされていない。しかし、重液体金属取扱いでは避け得ない課題であり、仮に回避のために流速を落とせば、小型ループに基づくプラント全体パフォーマンスの見直しを求められることになるかもしれない。

また、注目される腐食(短所④)に関しては、IPPE及びRDIPEの研究者は、酸素濃度管理と新たな材料開発により解決したと報告している。しかし、OKBM研究者は一定以上の大きさを有しなければならない地上炉に、彼らが開発した酸素濃度管理技術を適用するのは非常に困難であろうと指摘している。また、短所⑤については、RDIPEのV.Orlov自身が、地震国である日本において最適かどうかは即答しかねると答えている。

我々が最も注目する経済性改善の観点であるが、重液体金属冷却炉推進者は、化学活性度の高いナトリウム(Na)を適用するが故に必須となる重厚な安全系を排除できるため経済性向上を期待できると主張している。しかし、Na冷却高速炉を推す研究者は、Pb及びPb-Bi用機器の寿命は、例え開発耐食材であっても数年を超えないため、

コスト的に改善されないと反駁している。

以上に記述したように、関係者の報告内容や施設見学からは、重液体金属取扱に関する基盤的な技術や原理についての追求は確かに先行しており、多くの成果を挙げていることが分かる。しかし、潜水艦用炉や試験ループからかなりのスケールアップが必要な地上炉においては、先行小型ループ運転経験に基づき解決済とされた腐食も含め、問題が多数輩出する可能性が残されている。例えば、完成したとされる、酸素や水素注入システムにしても2インチ以下の配管における経験は、数十インチとなる実炉クラスでは役に立たず、酸素濃度の均質性を維持するのさえ困難であろうと思われる。

また、潜水艦用炉の実績にしても、それを原型とした量産小型モジュールで構成する地上炉（CBEP-75;75MW）建設予定は進んでおらず、潜水艦搭載炉自身さえ1990年代以降全く生産されないまま加圧水型に交代してしまっている事実を重く考えるべきである。さらに、重液体金属の高速炉冷却材への適用判断については、この分野で最も先行し、かつ強力に推奨しているIPPEの研究者が、一様に中規模地上炉を作って開発技術の適用性確認をすべきだとしている現実に留意すべきである。

参考文献

「ロシアの高速炉開発に関する調査報告」、日本原子力産業会議(1997)。

「日ロ高速炉専門家会議報告書」、日本原子力産業会議(1998)。

「『ロシアの高速炉開発に関する報告会』開催結果報告書」、日本原子力産業会議(1998)。

「日ロ高速炉専門家会議報告書」、日本原子力産業会議(1999)。

「原子力相が鉛冷却高速炉の開発を承認」、出典不明、NucNet.(1998)。

「鉛・ビスマス高速炉」、出典不明、ボーイスク(1998)。

2.1.3 八戸製錬（株）における亜鉛・鉛の製錬

八戸製錬株式会社は液体金属を利用して、亜鉛および鉛の精錬を行い、同時にその際発生する熔融金属冷却時の廃熱を回収して自家発電に有効利用するという独特な技術を有している事業所である。以下には同事業所における液体金属の利用状況ならびに安全取り扱いについて実地調査した結果を述べる。

(1) 八戸製錬株式会社と特徴

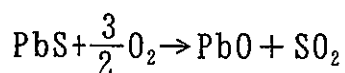
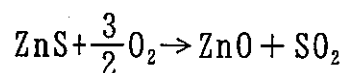
昭和 42 年三井金属鉱業（株）を代表に計 6 社の出資により設立された亜鉛と鉛の製錬会社で、副産物として硫酸、石膏、カドミウムも生産している。資本金約 48 億円、従業員 180 名の規模である。

この会社の特徴は 2 つあり、一つは亜鉛と鉛を同時に製錬する ISP 法（熔鉱炉方式）を採用していること。もう一つはエネルギーの再利用で、自家発電で必要電力の 7 割をまかなっていることである。中でも熔融鉛の冷却時の排熱を回収して行う発電は特殊なボイラーを用いた八戸製錬の独自の技術である。

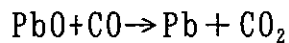
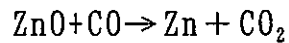
(2) ISP (Imperial Smelting Process) 法

ISP 法は 1950 年英国で開発された製錬方法で鉛と亜鉛を同時に製錬でき、原料には亜鉛と鉛が混合したスラッジなど純度の低いリサイクル原料が使えるという利点がある。亜鉛の製錬方法は電解法が一般的で、現在世界の亜鉛生産量の 8 割は電解法で製錬されている。ここ八戸製錬株式会社は世界でも最大級の ISP 法工場である。一方、ISP 法で得られる亜鉛は純度が高くなく、高純度亜鉛を得るためには後工程として精製工程を必要とするデメリットもある。

図 2.4 に溶錬工程の模式図を示す。原料はあらかじめ豆炭状に製団されるか、もしくは硫黄を含む原料については脱硫のため焼結後破碎されて、コークスとともに熔鉱炉に投入される。



原料中の ZnO、PbO は熔鋳炉のコークスで還元され Zn（蒸気）と Pb（金属鉛）になる。



亜鉛蒸気は熔鋳炉からコンデンサーへ送られ、そこで溶融鉛の飛沫に触れ、急冷液化し溶融鉛に溶解吸収される。亜鉛を吸収した溶融鉛は次工程（クーリングロンダー）で約 100℃（約 530℃から約 430℃）温度低下させる。温度低下による溶解度の差で溶融鉛から亜鉛を析出させ亜鉛を回収する。具体的には 560℃で亜鉛は 2.26%が溶解しており、これを 440℃まで冷却すると 2.02%まで亜鉛を析出するからその差 0.24%に相当する亜鉛が得られることになる。溶融鉛はポンプでコンデンサー部とクーリングロンダー部とを循環する。鉛循環量は約 7,000ton/h。

一方、金属鉛は熔鋳炉下部より連続的に抜き出すことにより粗鉛を得る。

(3) 特殊ボイラーによる発電

前述のように ISP 法は亜鉛を含んだ溶融鉛から亜鉛を析出させるため、溶融鉛を冷却させることが必要で、この時多量の排熱を発生するが、八戸製錬ではこの溶融鉛の排熱を特殊ボイラーで回収するという独自の方法により自家発電を行っている。（この溶融鉛からの熱回収による発電量は 4,300kW）

クーリングロンダー部の溶融鉛中に設置したボイラーの構造は、図 2.5 と 2.6 に示すように次のようなものである。2 重構造のケーシング（保護ケーシングと内部ケーシング）の内に蛇行した伝熱パイプを配置し、保護ケーシングと内部ケーシングの間およびケーシング内部には低融点合金（Pb-Bi）を充填し、溶融鉛からの熱を 2 重構造ケーシング及び低融点合金を介して伝熱パイプに伝えるものである。

このような構造になっている理由は、伝熱パイプの腐食による水蒸気爆発を避けるためである。即ち、腐食させる働きをもつ液体金属は鉛ではなく亜鉛であるため、伝熱パイプは低融点合金の入った

2重構造ケーシングに入れ、亜鉛を含んだ溶融鉛と接触するのを避けている。ケーシングの最外部の保護ケーシングは亜鉛を含んだ溶融鉛に触れるので腐食するのは避けられない。保護ケーシングは腐食したら取り替えている。20日ごとに装置を止め漏洩の点検を行っている。ケーシングの破損は低融点合金のレベルからも直ちに検知できる。

注：ケーシングの構造は当初二重構造であったが今は一重構造に換えたとのこと。また、低融点合金も当初 Pb-Bi であったが今は Pb に変えたとのことである。

特殊ボイラーによる発電について以下補足する。

ボイラーは蒸発器と過熱器より成る。水は蒸発器で約 200℃まで加熱され、過熱器に入って約 400℃の蒸気となる。蒸発量は約 29 ton/h で過熱器出口蒸気圧力は 16 kg/cm² である。蒸発器と過熱器とは同じ構造である。

揚鉛ポンプについて以下補足する。

型式： 機械式縦型遠心ポンプ

吐出容量： 3,350 ton/h 及び 4,950 ton/h (常時 2 台運転)

揚程： 1.8m

軸受：円筒型 (円筒の中に軸が入り、溶融鉛中にどぶ漬け状態に浸漬されている。)

使用温度： 通常操業時 約 530℃ 最大 650℃

(4) 安全などに関して

鉛を取り扱うため、鉛作業の法規制を受ける。工場内は局所排気装置を備えている。定期的に作業環境空気中の鉛濃度の測定をし基準値にあうことを確認している。従業員は防塵マスクを着用。定期的に健康診断 (鉛検診) を行い血中の鉛濃度を測る。体内に入った鉛は基本的には排出される (0.1mg/d) が、排出される以上に体内に入れば蓄積される。事故としては固まっていると思い熔融鉛に足をつっ込んだ事例がある程度である。

亜鉛や鉛はナトリウムのように水と激しく反応することはない。亜鉛は常温では燃えないが、空気中で高温に熱すると帯緑白色の火炎を出して燃え、酸化物となる。

ただし、熔融した亜鉛、鉛中に水分の付着したものを入れると、水分が急速に水蒸気になる体積膨張によりいわゆる「水蒸気爆発」が起こり、熔融メタルが飛散する。

消火器としては普通のもの（ABC 消火器など）を設置。従業員教育は入社時に一般的な安全教育を行い、年2回危険物・有害物の勉強会を行う。

(5) まとめ

八戸製錬株式会社では液体金属を亜鉛製錬の製造工程に利用し、また、液体金属の排熱を利用して発電をしている。世界的な競争を余儀なくされる非鉄金属の製錬という業種はともすれば円高で日本は不利な立場に置かれやすいが、そのなかで八戸製錬は、製錬方法をリサイクルに有利な ISP 法を採用し、工程内の廃熱を利用した特殊ボイラーの開発等による省エネを実施し、また徹底したコンピュータ化による少ない人数での操業管理を行うなどあらゆるコスト低減の努力を払って、技術的に液体金属の特徴を有効に使いこなしている。

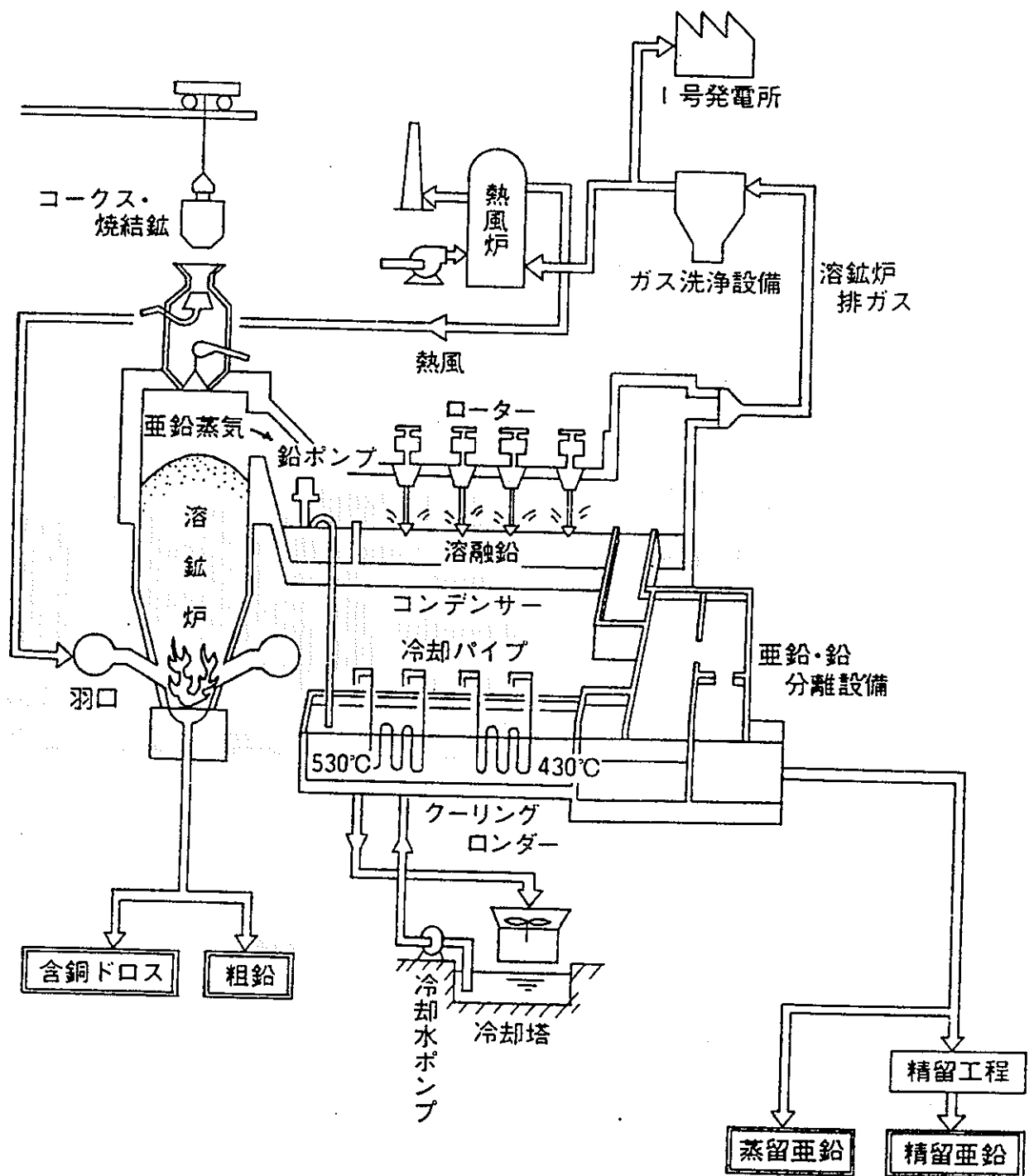


図2. 4 溶錬工程

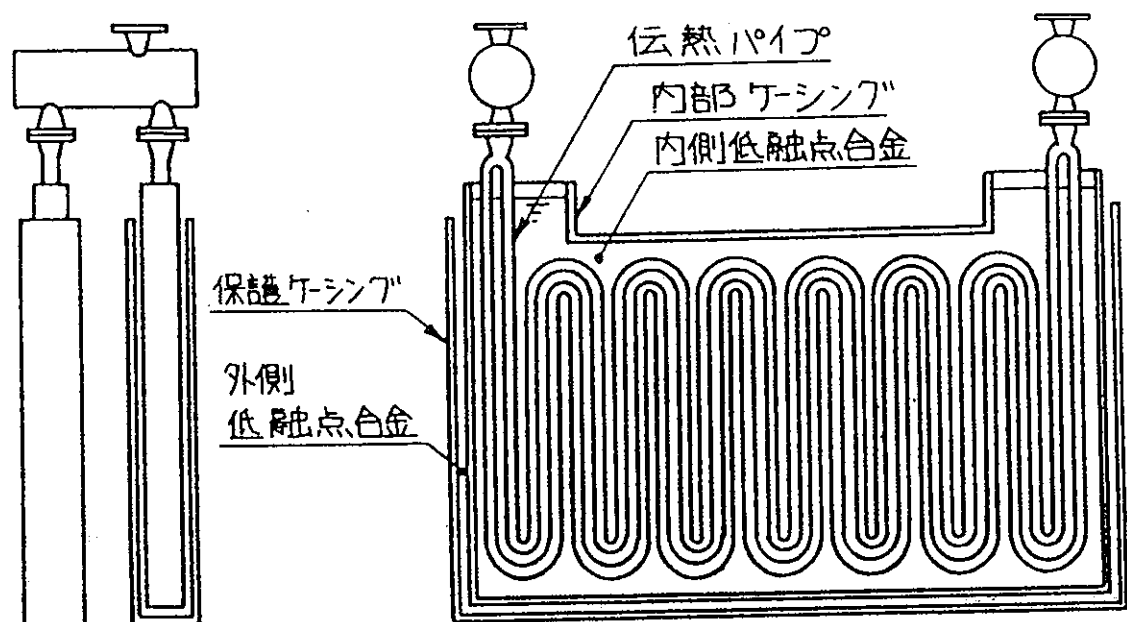


図 2. 5 ポイラーの構造

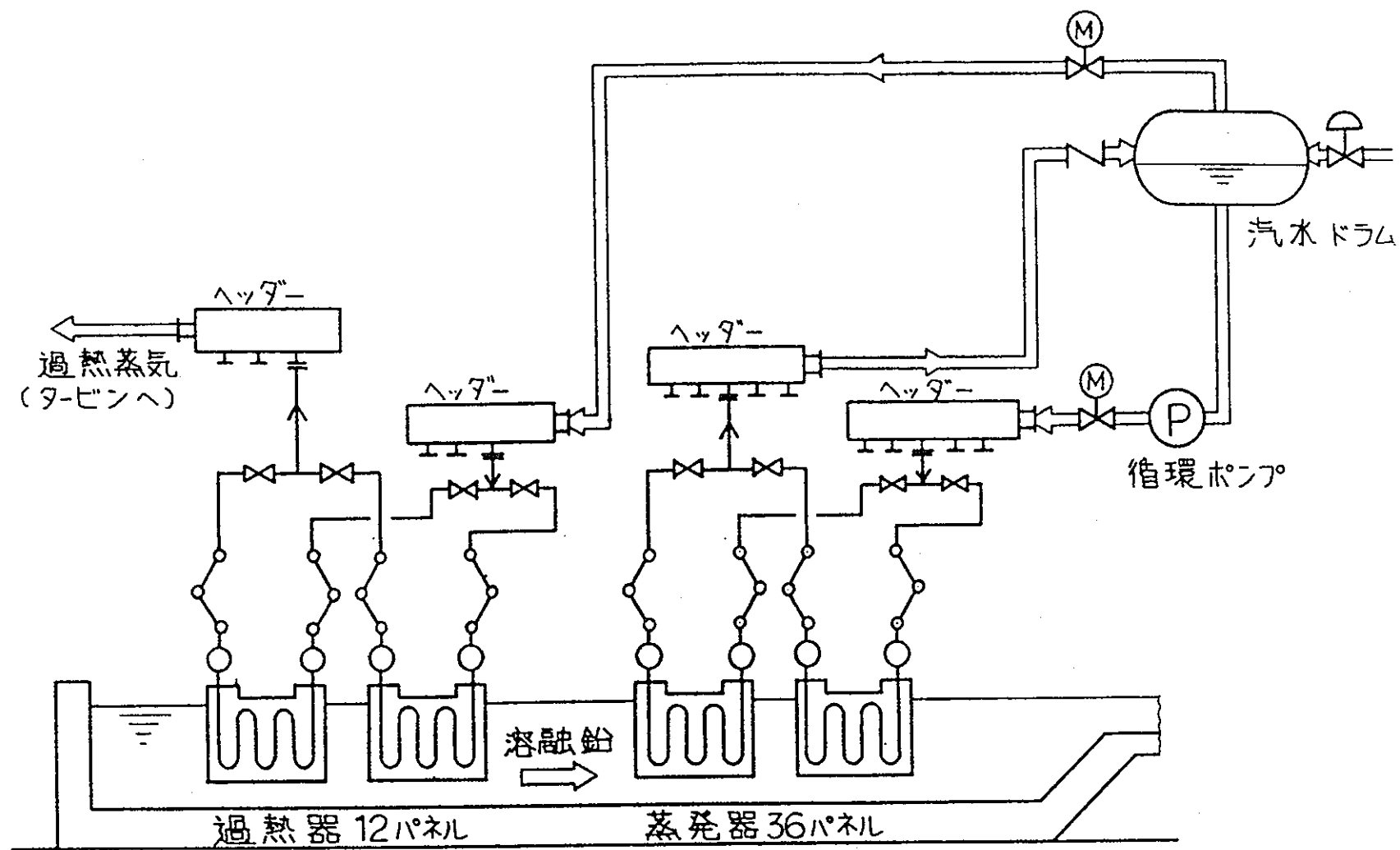


図 2. 6 熱回収フロー

2.1.4 使用済みナトリウム処理技術の調査

§ 1. はじめに

ナトリウム等の液体金属を使用後、安全に廃棄し、特に放射性物質の場合それを安全に隔離保管する技術は重要である。大量のナトリウム処理は基本的には不活性雰囲気下においてナトリウムと水との反応を用いるものである。英国ドンレイサイト(UKAEA)においてもデコミの一環として1,500トンのナトリウム冷却材の処理を行うことになっている。以下には、ドンレイサイトにおける使用済みナトリウム処理技術の調査結果を述べる。

§ 2. ドンレイサイト(UKAEA)の概要

ドンレイには材料試験炉 MTR(Materials Testing Reactor)、高速実験炉 DFR(Dounreay Fast Reactor)および高速原型炉 PFR(Prototype Fast Reactor)の3つの原子炉があるが、MTRを除き運転が停止し閉鎖されている。

DFRは1955年に建設が始まり1958年に完成、1959年初臨界、1977年まで運転がおこなわれて閉鎖された。その間DFRでは高速炉の燃料設計、冷却材技術、燃料再処理および廃棄物の取り扱いについて多くの経験を積み、高速炉開発に重要な貢献をした。DFRは熱出力60MW、電気出力15MWであり、冷却材にはNa-K(70%-30%)が用いられた。この一連の運転から、冷却材の使用実績を積み、安全性を確認した。また、燃料については最高7%の燃焼度を達成した。冷却材に関しては、一次系で配管のピンホールによるリークを経験している。また、ステンレス鋼のボイドスエリングによる燃料集合体の変形を経験し、次の炉の設計にこれら経験を生かした。

DFRのデコミは2007年までに終わらせる計画であるそのため、今後燃料および冷却材を処理する必要がある。2次系冷却材は60トン処理したが、燃料ピンがベントタイプ(開放型被覆管)であるため、1次冷却材中には多量のCs137が含まれている。そのため、今後Csの処理を行うためのプラントを建設して1次冷却材の処理をしていく予定である。

PFRは1967年に建設が始まり1974年臨界に達した。熱出力600MW、電気出力250MWであり、日本の高速原型炉「もんじゅ」とほぼ同等

の規模をもった原子炉である。1994年に運転が停止し閉鎖されたが、その間燃料の最高燃焼度として22%、ドライバ燃料の燃焼度として平均15~16%の値を達成したものもある。中間熱交換器からのナトリウムリークがあったが、全体に良好な実績を取めた。

現在デコミに取りかかっており、2008年に第1段階の処理を終える予定である。そこでは燃料の取出し、1500トンのナトリウム冷却材の処理を行うことになっている、そのため現在ナトリウムの処理施設を建設中である。2次系ナトリウムは現在タンクに入れられ 固化状態となっている。1次系のナトリウムはループ内で加熱され液体状態に保たれている。PFRの燃料はベント型でなく、またピン破損も少なかったので、1次系のナトリウムは汚れは小さい。

また、PFRでは冷却材をNa-KからNaに変えた理由としては、Naはコストがかからず、Na-Kに比べると放射能が低いので安全性が高い。また、Na-Kは融点がNaより低い、 KO_2 となるため、その酸化力が問題になるとのことであった。

再処理プラントではMTR、DFRで使用した燃料の再処理を行っている。ホットラボでは、燃料材料の分析、燃料化学、照射後試験、ボイドスエリングの研究などをおこなってきた。また、保健物理ではホールボデーカウンター、バイオアッセイなどを行っている。

ドンレイでの現在の主な業務は、・デコミッシング、・環境の復旧、・再処理、・放射性物質の廃棄、である。

廃棄物処理施設では、中レベル放射性廃棄物(ILW)をコンクリートで固めて貯蔵施設へ送り出す作業をおこなっている。最近では廃棄物から環境へ放出されるRIの量も減ってきた。また、ドンレイ作業者の被曝量も減ってきた。

環境浄化、復旧作業については、中レベル廃棄物を海岸のすぐそばにあるシャフトと呼ばれる豎孔に入れて埋設したが、Cs137を含むパーティクルと呼ばれる放射性物質が付近の海や海岸に流出し汚染した。現在規制当局からこのシャフトに埋設処理する方法は危険なので、禁止されており、さらに過去に埋設した放射性廃棄物を取り出して処理するよう命ぜられているとのこと。今後これら作業が大きな問題であるとのこと。

これらドンレイでのデコミ作業に関連するプラントの状況として

は以下のようになっている。

- ・ 現在稼働中のプラント
 - Cementation plant for ILW
 - Store for ILW
- ・ 建設中のプラント
 - Sodium disposal plant
 - Ultrafiltration plant
 - Low level liquid effluent treatment plant
 - Waste receipt assay characterisation supercompaction (WRACS for LLW)
 - Store extension for ILW
- ・ 計画中
 - Sludge treatment plant
 - New LLW disposal complex
 - NEW ventilation plant for FCA
 - FCA plant upgrades
 - Plant for treatment of Shaft/Silo waste
 - New store for ILW
 - Plant for vitrification of HLW

§3. 施設解体計画概要

デコミ戦略の概要の説明が行われた。先ず、デコミに関する総合的な計画立案の必要性について触れ、デコミプランはつねに最新最適であること、規制当局の聴聞会での意見を取り入れる必要があること、UKAEA がドンレイの総合的なデコミ戦略を作らねばならないことなどの事情があることの説明があった。

ドンレイの廃棄物処理と総合的なデコミプランは5つの項目からなっている。

- ・ サイトの復旧プラン
- ・ ドンレイでの放射性廃棄物管理記録
- ・ デコミプラン
- ・ 燃料プラン

- ・インフラ整備プラン

この計画の概要はすでに政府、規制当局へ提出しており、現状の計画では 2040 年ごろにすべて終了する予定である。

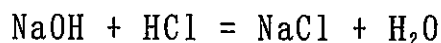
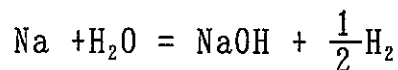
これからの作業として実施する項目は、

- ・廃棄物量の確認とコスト評価
- ・廃棄物と資源の能力の最適化
- ・専門家による幅広い議論と理解
- ・2040 年の終了予定の確認
- ・一般大衆に対する計画概要の印刷物による公表
- ・1999 年 12 月に計画書を NII(Nuclear Install and Inspection)に提出し、最終的な総合プランは 2000 年 9 月までに作成する。

§4.PFR およびナトリウム処理プラント

PFR とナトリウム(Na)処理プラントの見学に行った。PFR 建屋内に入り、デコミ処理にかかわる建てや内部の作業の状況を見た。その後施設内のホットラボを見た。Na 処理プラントは PFR 建屋のタービン撤去した場所に建設したものである。基本構成は NOAH そのものである。反応容器は Type316SS であり、容積は 1.3m³。下部より NaOH 水溶液が供給され、上部ノズルから Na が噴霧される方式である。ノズル形式は NOAH オリジナル。生成苛性ソーダ濃度は約 10mol/l(≒40wt%)である。現在装置類の建設はほぼ終了しており、これからナトリウムを入れて系統の試験を行うところである。冷却材として使用した実機ナトリウムを用いての試験はまだ実施されていない。

ナトリウム処理方法はナトリウムに水を添加して苛性ソーダの形にし、そのあと塩酸で中和して処理する方法をとっている。反応容器内の反応は以下で表される。



ナトリウムの処理量は 1 日 3 トン、総処理量は 1500 トンであり、ナトリウムの処理は 2003 年ごろに終了させる予定とのことである。

§5. 訪問後所感

英国における Na 処理・処分技術は、現状では仏国からの技術移転に過ぎない。予定が大幅に遅れ、訪問現在でも処理装置による作業は全く行われていなかった。そのため、実用上からの工夫も装置の改造も、未だ経験していない。PFR の Na 処理が本格化した後、Na 噴霧ノズル、供給 NaOH と生成 NaOH 濃度、最適な反応容器形状等についてきちんとフォローしておく必要がある。さらに、1 次系 Na についてのクリアランスレベルを提案中とのことであったので、この値や処理方法についてのフォローも必要であろうと思う。

ロシアならびに英国とも、原子力によるエネルギー生産を志向すれば、その資源(U)消費に関しては、高速炉は究極の利用形態であり、多くの研究者が、その冷却材に最も適している液体金属は現状 Na である、との認識で一致していたことは興味深い。ただし、両国は喧伝されているように、今後の主要なエネルギー生産システムになお原子力を選択するか否か、という点で大きく異なった決定を行っている。このため、当面、ロシアは Pb や Pb-Bi を含めさらに液体金属冷却技術の高度化を志向し、英国は処理処分技術の開発に力を傾注することになるが、将来的には、この研究開発の興味の差から液体金属利用に関わる両者の技術には大きな較差が生じていくものと思われる。

さらに、今回訪問して驚かされたことは、英国はもちろんロシアにおいても我々を迎える姿勢や技術の民生転換博覧会に見られるように情報開示に非常に積極的であったことである。むしろ、日本の原子力分野の方がある種の閉鎖性を保っている印象である。

2.2 液体金属の取扱いと事故トラブルの調査

化学的に活性な液体金属を冷却材として利用する場合、その液体金属の安全性に関するデータや事故トラブル事例を十分認識していることは、異常状態の回避や不幸にして異常状態に至ったときにはその被害を最小限に留めることのために重要なことである。ここでは液体金属の安全性に関する文献情報および事故事例について調査した結果を記す。

2.2.1 液体金属(Na)の安全性に関する情報入手

液体金属の安全性に関する情報入手については、文献、データベース等の情報の所在についての調査を行い、1次データの入手先についてある程度の見通しを得ることができた。そして、ナトリウムの安全性データをこれらの1次データに基づいて収集整理し、統括的な安全情報供給のフレームワークを作成した。その結果を以下に示す。

(1) 1次データ入手先

1次データの入手先としては、次の物が適当であることを確認した。書籍としては、「化学物質安全性データブック」、「化学物質の危険・有害便覧」、「化学薬品の混食危険ハンドブック」、「ザックス有害物質データブック」、「プレスリック危険物ハンドブック」、「化学防災指針」、「災害情報（雑誌）」、「安全工学（雑誌）」、「'98死亡災害データベース CD-ROM」、「労働衛生のしおり」、「有害物質の接触災害のガイドライン」、「化学火災事例集」、「平成11年度災害・事故年鑑（丸善）CD-ROM版」が挙げられる。また、データベースとしては、中央災害防止協会の災害情報、災害情報センター、日本化学工業会のデータ、PC-FACTS、ならびに各種の文献検索を利用することができる。これらの1次情報は必ずしも液体金属についてのみを扱っているわけではないので、情報の適切な選別ならびに整理が必要である。

(2) ナトリウムの安全性データ

1次情報からナトリウム関連のデータを選択し、ある程度整理し

た結果を次に示す。

ナトリウム [sodium]

化学式: Na

CAS 番号: 7440-23-5

国連番号: 1428

禁水性物質、急性毒性物質

DOT 分類: 表示: Flammable Solid and Dangerous When Wet

物理／化学的性質

外観など: 銀白色固体

分子量: 22.99~22.997

溶解性: 水を強く分解

蒸気圧: 1.2 mmHg(400℃)

沸点: 880.0~881.4℃¹, 892℃²

融点: 97.7~97.81℃

比重: 0.971(20℃)

比熱: 0.292 cal/g℃ (25℃)

熱伝導率: 0.205 cal/cm s °C (100℃)

蒸発熱: 1005 cal/g (bp)

融解熱: 27.05 cal/g

危険性情報

燃焼性・反応性等: 融点以上に加熱すると黄色い炎を出して燃える。

空気: 加熱したナトリウムは空气中で自発的に発火する。空气中で燃焼する際は、溶融した金属が飛散し、火事を大きくしたら、火傷の危険がある。長時間空気にふれると爆発性のある過酸化ナトリウムを生成する。乾いた空气中では 550℃まで非常にゆっくりと反応。

引火点: 115℃以上²

水: 水との接触により発火。水を激しく分解して水素を発生し、黄色の炎をあげて燃える。発生した水素が空気と爆発性混合ガスをつくり、反応熱により爆発することがある。

フッ素、塩素、酸素、フッ化水素、スチームなど：反応し、発火することがある。

ハロゲン、酸、ハロゲン化炭化水素：発熱的に反応

過酸化ナトリウム：500℃で激しい反応

硝酸アンモニウム：爆発性混合物生成

硫黄：摩擦により爆発

ジエチルエーテル：条件により爆発・発火

1,2-ジクロロエチレン：空気中で自然発火性ガス生成

無水マレイン酸：条件により爆発的な分解

硝酸：発火

硫酸：爆発的な反応

無水クロム酸：加熱により自熱反応

クロロホルム：敏感な爆発性混合物生成

四塩化炭素：高温で激しい反応

トリクロロエチレン：空気中で自然発火性のガス生成

塩化水素：爆発的な反応

塩酸：爆発

フッ化水素：爆発的な反応

アンモニア：衝撃に敏感で条件により爆発

塩化アンモニア：最大発熱量 2.63 kJ/g

塩化鉄(III)：衝撃に敏感で非常に激しい爆発

五塩化バナジウム：衝撃に敏感で強い爆発

ヒドロキシルアミン：空気中で自然発火

炭素：爆発

塩素：発火

銅：衝撃に敏感で爆発

ヒドラジン水和物：高熱を発する

塩化マンガン(II)：最大発熱量 1.96 kJ/g

有害性情報

急性毒性：マウス、腹腔内 LD50=4 g/kg

人体への影響：目に入ったり、湿気または発汗している皮膚につくと、反応熱で火傷および生成した水酸化ナトリウムによりアルカリ

薬傷などを起こす。特に目に入ると、結膜が侵され失明することがある。

融解したナトリウムが直接皮膚に接触すれば、激しい火傷の他にアルカリによる薬傷を起こし、皮膚のみならず筋肉ならびに骨組織をも腐食する。また融解したナトリウムの入った容器や配管などに直接接触すれば高温であるので皮膚火傷を起こす。アルカリ薬傷は比較的出血が少ないが、治療は困難なことが多く、ひどい場合には死亡することがある。

ナトリウムが水に接触したり、融解したナトリウムが水または低温の液体に接触するときには、ナトリウム細片となって遠くまで飛散し、眼の中に飛び込むことがある。これらの細片はナトリウムのこともあり、水酸化ナトリウムのこともあり、水酸化ナトリウム水溶液のミストのこともあるが、すべて発熱反応と水酸化ナトリウムによるタンパク質分解作用を起こし粘膜を侵し、さらに深所に及び、視力を低下させ失明に至らしめることが多い。

口の中に入り、飲み込んだ時には、食道、胃の粘膜を侵され死亡することがある。急性または慢性の吸収性中毒は起こさない。

ナトリウムの熱気やミストを吸入すれば、ナトリウム、水酸化ナトリウムならびに炭酸ナトリウムなどにより気管支、肺などに炎症を起こし、濃度が高い時には呼吸困難となり、死亡することがある。通常、作業室内における空気中の水酸化ナトリウム奮迅またはミストの許容濃度は 2 mg/m^3 であるが、融解したナトリウムが噴出した際には相当濃度の高い物を呼吸することとなり危険である。

応急措置

目に入った場合：直ちに多量の水で15分間以上洗い流す（まぶたを親指と人差し指で広げ、眼をあらゆる方向に動かす）。眼科医の診察を受ける。

皮膚に触れた場合：直ちにブラシで払い落とし、汚染された衣服やくつ等を脱がせる。直ちに付着部または接触部を石鹼水で洗浄し、多量の水を用いて洗い流す。

吸入した場合：直ちに患者を毛布等にくるんで安静にさせ、新鮮な空気のある場所に移す。呼吸困難または呼吸が停止しているときは直ち

に人工呼吸を行う。

飲み込んだ場合：口をすすぐ。

火災時の措置

周辺火災の場合：速やかに容器を安全な場所に移す。

着火した場合：粉末（金属火災用）、乾燥したソーダ灰または乾燥砂、食塩、黒鉛粉等でナトリウムが露出しないように完全に覆い消火する。消火作業の際には、燃焼によりできた酸化ナトリウムが空气中で水酸化ナトリウムとなり、皮膚、鼻、のどを刺激するから、消火の際には必ず防塵マスクまたは送気マスクなどを着用する。消火後の措置は燃焼物が完全に冷却固化したことを確認した後空容器に回収し、その上を乾燥したソーダ灰、砂等で覆い安全な場所に移す。

注水は厳禁。炭酸ガス消化器、泡消化器などの使用厳禁。

消化剤：乾燥砂、乾燥ソーダ灰、粉末（金属火災用）、石灰

漏出時の措置

事故現場の周辺にはロープを張るなどして人の立ち入りを禁止し禁水を標示する。作業の際には必ず保護具を着用し、風下で作業をしない。危険区域では裸火禁止及び禁煙。こぼれたものにはふれない。漏洩物に水をかけない。容器内に水を入れない。乾燥した容器の中に入れ、漏洩場所を水で洗い流す。

流動パラフィン浸漬品：露出したナトリウムは、速やかに拾い集めて灯油または流動パラフィンの入った容器に回収する。砂利、石等に付着している場合は砂利等ごと回収する。

溶融固化品（タンク車、タンクローリー、200 リットルドラム缶）容器に穴があいたが愛には、パラフィン等でナトリウムの表面を覆った後、ガムテープ等で容器をシールする。パラフィン等が手近にない場合は、ガムテープ等だけで容器をシールする。更にそれらの上を防水シート等で覆って安全な場所に移す。

取り扱いおよび保管上の注意

酸化剤、酸と接触させない。水、二酸化炭素、ハロゲン化水素と激

しく反応するのでこれらと接触させない。加熱分解して生成した酸化ナトリウムが空气中で水酸化ナトリウムとなり、皮膚、鼻、のどを刺激するので注意する。軽油等の鉱油、石油中に浸漬し、水分の混入、接触をさけて保管する。冷所で雨水の漏れが無い場所に保管し、火気から隔離する。酸類など容器を腐食するものと隔離しておく。

暴露防止対策

設備対策：局所排気施設を設置する。洗顔施設および身体洗浄施設を設置する。

保護具：空気呼吸器、保護眼鏡、保護手袋、保護衣、保護長靴、保護面、頭巾など

廃棄上の注意

1. 不活性ガスを通じて酸素濃度を 3%以下にしたグローブボックス内で乾燥した鉄製容器を用い、エタノールを徐々に加えて溶かす。溶解後、水を徐々に加えて加水分解し、希硫酸等で中和する。

2. 少量（5～10g 以下）を廃棄するには、イソプロパノール（反応速度を増すために 2%の水を加える）の中に入れる方法が推奨されている。5

3. 50 g までの量では、ガス炎を使用して金属製の重い皿中で燃焼させるべきである。（発生するアルカリ性の煤煙を消散あるいは吸収する適切な設備が必要）5

4. 大量のものはスクラバーを具備した焼却炉の中で乾燥した鉄製容器を用い、油または油を浸した布等を加えて点火する。鉄棒でときどき攪拌して完全に燃焼させる。残留物は放冷後水に溶かして希硫酸等で中和する。

輸送上の注意

IMDG：4.3

IATA：4.3

関係法令

毒劇物取締法：劇物

消防法：危険物第3類

危険物船舶運送及び貯蔵規則：可燃性物質類（その他の可燃性物質）

労働安全衛生法：危険物（発火性）

人事院規則 10-4：人事院の定める危険物（発火性の物）

航空法

港則法

参考文献

Hawkes, A. S. et al., J. Chem. Educ., 1953, 30, 467

Alkali Metals, 1957

Houben-Weyl, 1979, Vol. 13.1, 287-289

Reuillon, M. et al., Proc. 2nd Int. Symp. Loss Prev. Safety Prom. Proc. Ind., 481-486, Frankfurt, Dechema, 1978

引用文献

- 1) 化学物質安全情報研究会編「化学物質安全性データブック」オーム社(1994)
- 2) 中央労働災害防止協会編「化学物質の危険・有害便覧」中央労働災害防止協会(1997)
- 3) 東京消防庁編「化学薬品の混触危険ハンドブック－第2版－」日刊工業新聞社(1997)
- 4) ザックス「有害物質データブック」丸善(1990)
- 5) ブレスリック「危険物ハンドブック第5版」丸善(1998)
- 6) 日本化学会編「化学防災指針5」丸善(1980)

災害事例

1. 事例) 医薬品製造工場において、反応用に使用する金属ナトリウムを押切機で細片にしたものの数片を、灯油の入った容器に投入したところ、突然爆発し灯油に引火した。

原因) ドラム缶入り灯油に水が混入し下層部にたまっていたものを、気づかずに容器に移し替えたため。

2. 事例) ドラム館製造工場において、キシロールと標示された空ドラム缶をスチーム洗浄しようとしたところ爆発した。

原因) 金属ナトリウムが混入していた。

1 次情報のいずれもここまで詳細なデータは提供しておらず、統括的に整理することの重要性が確認された。今後得られる情報を更に付け加えていくと同時に、他の液体金属についても同様の取り扱いをして、データブックとしてまとめていくことが求められる。

2.2.2 液体金属の特性と取扱いについて (Na 以外)

ナトリウム以外の液体金属に関する特性と取扱いに関する情報を以下にまとめて示す。ここで扱った液体金属は、Li, K, Mg, Zn, Hg, Al, Ga, Pb, Bi の 9 種類であり、性状、用途、製法ならびに取扱い上の注意などについてまとめて表 2.3 に示す。なお、本表をまとめるにあたり参考にした文献は「13599 の化学商品」化学工業日報社、1999 年である。

表 2. 3 液体金属の特性と取り扱いについて

元素名	性 状	用 途	製 法	取扱上の注意	備 考
Li	<p>金属リチウムは最も軽い金属で、その性質はナトリウムなどアルカリ金属に似ており活性で水と激しく反応して水素を発生する。</p> <p>原子量：6.940 比重：0.534 融点：180℃ 沸点：1336℃</p>	合成ゴム重合用触媒（リチウムアルキル化合物で主として有機ブチルリチウム）の原料、金属還元材、合金添加、リチウム電池	<p>鉱石からリチウムの抽出法は①硫酸法、②石灰法、③塩化法など種々あるが、普通は①硫酸法が用いられる。この方法は鉱石を焙焼し、粉碎してから硫酸を加え加熱するとリチウムとなるので、これを水で抽出して硫酸リチウム溶液とし、これにソーダ灰、消石灰を加えて鉄、アルミニウムなどの不純物を除去する。</p>	<p>金属リチウムは湿気にあうと水素を発生し、発火・爆発の危険性がある。また加熱により発火し酸化剤、酸との接触によっても爆発の可能性もある。火気厳禁。</p>	<p>皮膚についた場合多量の石鹼水ですぐ洗う。但しリチウムに水をかけてはならない。</p>
K	<p>銀白色の金属性軟い固体。水と激しく反応し水素を発生し発火に至る。ナトリウムより反応性が高い。</p> <p>原子量：39.1 比重：0.86 融点：63.7℃ 沸点：774℃</p>	還元剤、有機化合物の合成、無機化合物原料、Na-K 合金、触媒	<p>①塩化カリウムの金属ナトリウムによる還元。 ② 2 種の非鉄金属を還元する。（本荘ケミカルで開発） ③ナトリウムの電解製造法と同じ。</p>	<p>極めて酸化され易い金属であり、空気中に放置すると自然発火して燃焼し火災を起こす恐れがある。水に接触すると極度に激しい反応を起こし水素を発生する。しかも反応熱が大きいので水素に着火して爆発を起こす。軽油、トルエンなどに浸し水分の混入接触を避けて保管する。</p>	<p>毒性：目に入ったり、発汗した皮膚につくと反応熱で火傷及びアルカリ薬傷など起こす。</p> <p>消火上の注意：乾燥した食塩に炭酸カルシウムを混合したものが比較的有効。注水厳禁。炭酸ガス消火器の使用禁止。</p>

元素名	性 状	用 途	製 法	取扱上の注意	備 考
Mg	原子量：24.32 比重：1.74 融点：651℃ 沸点：1090℃ 機械的強度が小さいが、 比強度は最高値を示し、 硬度が低く、切削性が非常に良い金属。	アルミニウム合金添加用、ジルコニウム・チタニウム製錬用、ノジュラー铸铁用、マグネシウム铸件製造用、防食用、還元剤、マグネシウム電池、化学薬品製造用（グリニャール試薬、その他）、鉄鋼の脱硫剤	①電気分解法：塩化マグネシウムの1.25 水塩を電解する Dow 法。アマックスマグネシウム社、アメリカンマグネシウム社が新電解法を開発している。 ②フェロシリコン還元法： $2\text{MgO} \cdot \text{CaO} + \text{Si} \rightarrow 2\text{Mg} + 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ の反応に基づくフェロシリコンを還元剤とする方法。CaO、MgO、Fe-Si を理論モル比より Fe-Si を 10~20 % 過剰に加え原料を団鉱にして真空中にて 1200℃ に加熱還元する。	粉末の場合、酸化剤と混合したものは過熱、衝撃、摩擦で着火し水分で自然発火することがある。粉塵爆発を起こす。熱、水、酸と接触すると水素が発生し、その水素が爆発することがある。粉状のものが大量にある場合、常温でも空気中の湿気により酸化発熱し爆発したりする。	毒性：毒物としての取り扱いには受けないが、酸化マグネシウムの粉末は吸入によって発熱を起こすことがある。マグネシウムが皮膚内に侵入した場合激しい炎症を起こす。 消火上の注意：注水厳禁。特殊粉末消火薬剤、乾燥砂、乾燥珪藻土などで被覆する。
Zn	原子量：65.38 比重：7.142 融点：419.5℃ 沸点：907℃ 空気中で加熱すると燃焼する。酸、アルカリに溶けて水素を発生する。	亜鉛鉄板、亜鉛版、黄銅、伸銅品、亜鉛合金ダイカスト、写真製版、亜鉛華、亜鉛末など	①電解法：世界の主流を占め（80 %）、亜鉛精鉱を焙焼し、溶解槽に入れ電解廃液で溶かし、ろ過器で硫酸亜鉛溶液と鉄を主成分とする濃泥に分離する。硫酸亜鉛溶液の不純物を除き電解する。陰極に亜鉛が析出する。 ②堅型蒸留法：亜鉛精鉱を焼結してから石炭およびコークスと混合させ、炭化炉で炭化団鉱とする。これを堅型レトルトで加熱すると亜鉛が蒸気となって上昇する。亜鉛蒸気は冷却器で凝縮し亜鉛地金になる。 ③伝熱蒸留法：主な装置は焙焼炉、焼結炉、抵抗電熱炉、コンデンサーで亜鉛精鉱を抵抗電熱炉によって製錬し蒸留亜鉛を製造する。 ④ISP法：亜鉛、鉛の同時製錬法で炉底から粗鉛を回収し亜鉛ガスはコンデンサーで冷却して蒸留亜鉛とする。	塊には火災・爆発の危険はないが、粉末は空気と爆発性の混合物を作る。	毒性：皮膚刺激性はほとんどない。高温下では比較的揮発しやすく、亜鉛のヒュームを吸入すると数時間後に悪寒とともに高熱がでる。

元素名	性 状	用 途	製 法	取扱上の注意	備 考
H g	原子量：200.61 比重：13.551 融点：-38.88℃ 沸点：356.7℃ 銀色、流動性のある金属元素。沸点近くで長時間加熱すれば HgO となる。	乾電池、水銀塩類（昇汞、銀朱など）、蛍光灯、体温計および計量器、電気機器用、アマルガム、合成化学用（触媒）、苛性ソーダ、塩素電解用	辰砂（HgS）から製造するには高温に加熱するか石灰と混ぜて蒸留する。蒸出する水銀蒸気をコンデンサーで冷却凝固する。	アセチレン、塩素、アンモニアと激しく反応。銅および銅合金材料を侵す。加熱すると有毒な蒸気が発生する。	毒性：水銀蒸気を吸入すると肺水腫をおこすことがある。また、皮膚からも吸収する。 消火上の注意：泡、炭酸ガス、ドライケミカル、四塩化炭素消火器を使用。
A l	原子量：26.97 比重：2.71 融点：658.8℃ 沸点：2327℃ 銀白色の柔らかい金属。	圧延品、電線、鋳鍛造品、ダイカスト	ボーキサイトを粉砕し、苛性ソーダに溶解させてアルミン酸ソーダ液をつくり、アルミニウム以外の成分（赤泥）を分離する。次にアルミン酸ソーダ液から水酸化アルミニウム（白泥）を沈殿させる。これを回転炉に入れて約 1200℃で焼成しアルミナにする。弗化アルミニウムを加えた氷晶石をアルミナとともに陰極の働きをする電解槽に入れ電極に強い電流を流す。これによりアルミナはアルミニウムと酸素に分解する。	アルミニウム粉、箔、リボンは加熱すると燃焼する。粉塵爆発を起こす。ハロゲンと接触すると自然発火することがある。水、酸、アルカリと接触すると水素が発生しその水素が爆発することがある。 火気、摩擦、衝撃など厳禁。	毒性：毒性はないが、粉末を多量に吸収すると肺に傷害を起こす。傷口に入って皮膚炎を起こすことがある。 消火上の注意：砂、むしろ、麻袋などで覆ってから注水する。
G a	原子量：69.72 比重（融点時）： 5.904（固体） 6.095（液体） 融点：29.78℃ 沸点：2300℃ 帯青白の柔らかい金属。空気中では比較的安定で乾いた酸素や空気とは 260℃付近まで作用しない。	リン、砒素、インジウムなどとともに化合物半導体として発光素子、ミリ波・マイクロ波の発振素子。 酸化カリウムと酸化ガドリニウムとの結晶は磁気バブルメモリー用基材として電子機器部品を形成する。	ガリウムは亜鉛製錬、アルミ精錬（ボーキサイト中のガリウム 30g/t）副産物として回収される。	アルミニウム製のコンテナで輸送する場合は漏洩に対して特別な注意が必要である。	体内への摂取、皮膚との接触または吸入は有害である。

元素名	性 状	用 途	製 法	取扱上の注意	備 考
P b	原子量：207.21 比重：11.34 融点：327℃ 沸点：1740℃ 帯青色の柔らかい金属で、ハロゲン元素と良く作用し希酸には一般に侵され難いが硝酸のような酸化性のある酸には溶解する。	鉛管・板、蓄電池、電線被覆、リサーチ、丹、鉛白、はんだ、活字	①電解法：鉛鉱石を熔鉱炉で製錬して粗鉛とする。更に電解精錬して電気鉛とする。 ②乾式法：粗鉛までは①の電解法と同じだが乾式法は原鉱にビスマスが含まないときだけに行われる。粗鉛を溶融鍋で溶かし、おがくずおよび硫黄粉末を添加し、銅、アンチモンなどの不純物をドロスとして除去する。次に錫、砒素などをハリス法によって、金、銀、銅などはパークス鍋に移して亜鉛を投入することにより取り除く。最後に精製炉に移して亜鉛を蒸発させる。	鉛化合物自体に引火性・爆発性はないが火災時に分解して酸素を放出する。	毒性：鉛の摂取量が増すと骨組織に沈着し、さらに血液中に遊離して毒性を現す。 一日 0.5mg 以上吸収すると蓄積して毒性を現す。0.5g 吸収すると致命的である。 慢性症状としては疲労、頭痛、四肢の感覚傷害、けいれん、排尿障害など起こす。
B i	原子量：208.98 融点：271.3℃ 沸点：1560℃	冶金添加物、フェライト、低融点合金、医薬品、触媒、化粧品、鉄鋼や他の金属の機械加工性良好添加剤、セレンの被覆、伝熱材料、永久磁石	粗鉛からビスマスを分離する方法として①分別結晶法②電解製錬法③ビスマス除去剤としてカルシウムやマグネシウムの添加（Betterton-kroll法）がある。		砒素、アンチモンに似た毒性があると同時に鉛、水銀にも似た障害が起こるが、一般には水に不溶でこの中毒は少ない。

2.2.3 事故トラブル事例

国内外の Na 取扱施設における事故トラブル事例を調査した。国内の事例は、危険物保安技術協会が平成 11 年 3 月に発行した「アルカリ金属を取扱う危険物施設の安全対策に関する調査検討報告書」及び新聞報道等によった。危険物保安技術協会の調査検討報告書は、国内の 1,000Kg 以上のアルカリ金属を取扱っている 23 事業所 46 施設について調査した結果をまとめたもので、化学工業、Na 製造、Na 実験、原子炉及び Na/硫黄電池施設が含まれている。調査対象期間は昭和 48 年から平成 8 年までの 24 年間である。

一方、外国の事例は、太陽発電プラントの例を除いて、Na 冷却高速増殖炉で起った系外への Na 漏洩、Na 火災及び蒸気発生器での Na-水反応例をまとめた。これらは国際会議、公開文献、その他の調査報告などからの情報をもとにしたもので、1960 年代前半から 1990 年前半までの事例である。

(1) 我国の Na 取扱施設における Na 漏洩

表 2.4 に我国で発生した Na 漏洩、Na 火災の事例をまとめて示す。化学工業、Na 試験施設での例が多く報告されている。Na 試験施設での事故の状況は、後で述べる外国の事例内容と殆ど類似しているが多い。また運転中に注意を払えば事故は十分に防げたと思われるものがある。

図 2.7 は今回の調査の中で我国では最大量の Na が漏洩した事故状況を示したものである。移動タンク貯蔵所（タンクローリ）から生産施設の Na タンクに Na を送る配管の継ぎ部分のガスケット取付が不良であったためそこから Na が漏洩した。この事故では当然のことではあるが部屋が機密構造でなければ N₂ による窒息消火はできないこと、及び Na-コンクリート反応を防止する保護壁が必要であることが示された。消火剤として食塩が有効であることも実証された。

図 2.8 は Na 試験装置のフリーズシール部分で起った Na 漏洩事故の状況を示したものである。これと同様の事故を外国でも数多く経験している。Na 配管の修理ではフリーズシール法を使わなければならない場合があると考えられることから、Na が特に熱伝導性の良い

物質あることを考え、配管切断後は必ず密封蓋をするなどの対策をとらなければならない。

(2) 外国の Na 取扱設備における Na 漏洩

表 2.5 に Na が機器から系外に漏洩し火災を起こした例、表 2.6 に漏洩はしたが火災にはいかなかった例、表 2.7 に蒸気発生器内で起った Na-水反応例をまとめて示す。各機関の事例を見ると類似の事故が繰返し起っているのがわかる。設計上の工夫が足りなくて事故にいたったものの他、Na 取扱や運転の操作ミス、不注意からのものと思われるものが少なくない。表 2.5~2.7 のリストの中から特徴的な 5 つの事故例を以下、図 2.9~2.13 に示す。

図 2.9 は Na 弁からの漏洩を説明するもので、今回の調査リストの中で最も多い事故数であった。Na 漏洩の直接の原因は弁軸の貫通部をシールするペローズの破損にあった。ペローズの破損原因は繰返し応力による疲労破壊とするものが多いが、もともとペローズは繰返し伸縮をさせて使用するものであるから、応力低減のための最適設計が求められる。また、ペローズの肉厚は通常 0.15~0.2mm 前後であることから腐食しないようペローズ周りに Na 中の不純物が停滞したり蓄積されないような構造にすべきであろう。万一、ペローズが破損し Na が弁軸を伝わって漏れ出した場合にはいち早く検出するための Na 漏洩検出器が設けられている。さらに、Na を大量に漏洩させないために弁軸と弁箱にバックシール機構が設けられている。原子炉で使用されている Na 弁の数は相当数あることから Na 弁事故防止は重要な課題の一つである。また、ペローズは弁の他にも表のリスト中にも示されているように制御棒駆動機構にも使われていて破損したことが報告されている。

図 2.10 は中間熱交換器において温度差を有する Na によって下降管と胴体の間に熱膨張差が生じ、それが原因となり繰返し応力がかかった部材が疲労破損し Na が漏洩した例である。Na 機器の場合この熱膨張差吸収構造をどのようにするかが最も重要な技術課題である。図 2.10 の例では複数個の中間熱交換器が同じ場所で同じような漏れ事故を起こしたため抜本的な構造の変更がなされた。表のリストの中では熱膨張差に起因する漏れ事故の例がいくつかみられる。

図 2.11 は熱の回収に Na を使用した太陽発電の集光器とタンク間の配管から Na が漏洩し火災となった例である。原因は Na 弁修理のため配管の一部分を Na でフリーズシールしたつもりがなされていなかったために起ったものである。この事故ではスプレー燃焼という新たな課題が提起され、その後の研究に大きなインパクトを与えたと言われている。また、漏洩停止操作でタンク内の圧力開放ができなかったことが事故の拡大をまねいており、圧力開放システムの重要性と、そのシステムが常に作動できるよう機器の点検整備が必要であることを示唆している。なお、修理した Na 弁がついていた場所は高温側配管か低温側配管か不明であるが、説明の都合上図 2.11 には筆者が低温側に追記した。

図 2.12 はトレイの効果が検証された中間熱交換器ドレン配管からの Na 漏洩の例である。漏洩原因は図 2.11 の場合と同様に配管のフリーズシールに問題があったためである。この事故では漏洩量が少なかったために N_2 による窒息消火設備の稼動はさせなかったようであるが、漏洩 Na を回収するトレイの有効性が実証されている。

図 2.13 は蒸気発生器の Na-水反応事故の例である。この事故例は組み立て作業中に用いた化学洗浄液による伝熱管の腐食、伝熱管の支持板との間での摩耗、管-管板溶接部の溶接欠陥、管板リガメントの割れなどが原因とされている。その他の蒸気発生器事故も水漏洩箇所は表 2.7 の事例リストに示されるように伝熱管又は伝熱管溶接部が主である。原因は溶接欠陥や熱応力による疲労破損である。Na-水反応は最初小さな欠陥からの漏れによるものであっても、Na と反応した高温の水-Na 混合ジェットにより伝熱管に連鎖的に伝播し破損して大リーク事故に発展する。1987 年に起こった PFR (英) の蒸気発生器の Na-水反応事故はまさにこのような例であった。この事故は管板や伝熱管支持部の構造設計、洗浄液の完全除去の重要性を示唆している。

(3) Na 漏洩事故の主な原因についてのまとめ

以上、我国の Na 取扱施設における Na 漏洩事故及び外国の Na 取扱設備における Na 漏洩事故について述べた。国や機関が異なっても事故の内容、その原因は殆ど同じと言って良いようである。

以下に主な原因をまとめて示す。

- (a) Na 弁及び制御棒駆動機構のベローズの破損
- (b) フリーズシール部の養生不良 (Na 取扱いの基本忘れ)
- (c) ヒータの絶縁劣化によるアーク放電での機器壁の焼損
- (d) 熱膨張に対する考慮不足の構造設計
- (e) T-継手部の熱サイクル疲労 (高温 Na と低温 Na のミキシング)
- (f) 溶接不良、溶接欠陥部の時効による拡大
- (g) Na の局所加熱による膨張圧による破損
- (h) 蒸気発生器の管-管板溶接部欠陥、リガメント割れ
- (i) 溶接部の水素による遅れ破壊
- (j) 洗浄残液による蒸気発生器伝熱管の腐食
- (k) 蒸気発生器伝熱管の支持部におけるフレッティング摩耗
- (l) 基本を守らない Na 取扱い

同じような事故が、同じような原因で繰返し起ると言うことは、それだけ潜在的ポテンシャルが高いことを示すものであり、機器の設計、製作及び Na の取扱、運転にはここに述べた経験を十分に参考にしていくことが大切である。

表 2. 4 我国における Na 漏洩・火災事例 リスト

(危険物保安技術協会 発行の「アルカリ金属を取扱う危険物施設の
安全対策に関する調査検討報告書 (平成 11-3) による)

使用目的別	発生年	Na 漏洩場所	事故の状況	漏洩量
化学工業	1979	移動タンク貯蔵所接続配管	フランジガasketの取付不良により Na が漏洩し火災	3.5 トン
化学工業	1984	重合槽配管	配管き裂より漏洩した Na と水の反応熱によりメタノールに着火し火災	
化学工業	1993	有機溶媒蒸留装置	Na と有機溶媒をフラスコで加熱中蒸気圧の高まりで栓がはずれ Na が飛散発火し、有機剤に引火して火災	
Na 試験	1974	Na 試験装置ヒータピン	試験体ヒータの絶縁低下によるアーク放電によって管に孔があき Na が漏洩し火災	
Na 試験	1981	Na 試験装置配管サポート部	サポート溶接部付近に微細なき裂が発生して Na が漏洩し火災	
Na 試験	1985	Na 試験装置貯蔵タンク配管ノズル部	ノズル溶接部の腐食により Na が漏洩し空気に触れて発煙	
Na 試験	1988	Na 試験装置の Na フリーズ配管	フリーズしていた配管内の Na が高温試験部からの熱伝導により溶解して漏洩し火災	30 リットル
FBR	1995	原子炉二次系配管温度計	温度計鞘管が Na 流れによる振動により疲労破損し Na が漏洩し火災	
Na 製造 ?	1993	Na タンクローリ	タンクローリへ Na を充填中に液位計が作動不良となり点検するため引抜いた際に Na が漏洩	
(保管中)	1973	Na 保管容器	保護液がなくなり空気に触れ発火	
(保管中)	1981	Na 保管容器	保護液がなくなり空気に触れ発火	

上記報告書に掲載されていない事故例

Na 試験	1988	Na 試験装置配管 (1998-4-22 毎日新聞)	配管支持金具の溶接部にピンホール又はき裂が発生して Na が漏洩し発煙	100CC 程度
Na 試験	1968	Na 試験装置主加熱器 ((株) 工業調査会 発行「化学火災事例集 (1971)」)	主ヒータ容器のヒータ貫通溶接部で、絶縁不良のためスパークし孔があいて漏洩し発火	40~50 kg

表2. 5 外国における Na 火災事例リスト

機 関	発生年	Na 漏洩場所	事故の状況	漏洩量
EBR-II (米)	1968	Na 弁	ベローズが破損し漏洩	不明
	1987	Na 弁	本体とボンネット間のガスケット部より漏洩	不明
	1969	電磁ポンプ	電極ロウ付部が破損し漏洩	3.5 lb
	1971	空気冷却器	機械加工溝部が熱疲労により破損し漏洩	< 8 l
	1968	純化系配管	修理のため一時的にフリーズシールしていた配管内の Na が高温部からの熱伝導により溶解し漏洩	300 l
DFR (英)	1970	二次系ループ	Nak の漏洩	微少
KNK (独)	1971	二次系ループ	予熱ヒータ溶接部が破損し漏洩	1000 kg
Phenix (仏)	1976 ~1988	中間熱交換器	Na 出入口二重管部が熱膨張差により疲労破壊し漏洩 (同漏洩は 5 件発生)	不明
FBTR (印度)	不明	二次系 コルトトラップ ^o	コルトトラップ ^o 予熱中に中の Na と冷却用有機流動体との加熱媒体である NaK が漏洩	数 l
太陽熱発電 (スペイン)	1986	集光器とタンク間の Na 配管	弁修理作業のため一時的に Na でフリーズシールしたつもりが配管内の Na が固まっておらず弁のフランジを開放したとたんにそこから Na が漏洩	15 m ³
BN-350 (旧ソ連)	1989	蒸気発生器	蒸気発生器内で起こった Na-水反応ジェットにより胴体壁に直径 10mm の孔があき Na が漏洩	150 kg
BN-600 (旧ソ連)	1980	Na 弁	本体と上蓋の間のガスケット部より漏洩	1 kg
	1981	Na 弁	シール部の溶接部に欠陥が生じ漏洩	300 kg
	1982	蒸気発生器 仮設配管	主配管に接続した仮設配管を切離したところ主配管部の溶けた Na が漏洩	10 kg
	1990	蒸気発生器 ドリ配管	製造欠陥による溶接部周方向のき裂より漏洩	600 kg
	1993	一次系 純化系配管	コルトトラップ ^o の主配管と枝管の T 継手溶接部に熱膨張差によるき裂が発生し漏洩	1 m ³
	1994	中間熱交換器 二次系ドリ配管	弁修理作業のため一時的に Na でフリーズシールしたつもりが、配管内にガスが溜っていて Na でシールされなかった。その配管を切断したため漏洩	漏洩量 約 1300kg 燃焼量 16kg

表2. 6 外国における Na 漏洩事例リスト

機 関	発生年	Na 漏洩場所	事故の状況	漏洩量
EBR-I (米)	—	二次系主配管	SUSO リング部がゆるみ漏洩	
EBR-II (米)	1964	電磁ポンプ	導管が振動破損し漏洩	
	1966/1987	制御棒駆動機構	ベローズが破損し漏洩 (5 件)	
	1969/1988	Na 弁	ベローズが破損し漏洩 (7 件)	
	1983	Na サンプリンググループ	スエジロック部がゆるみ漏洩	
SEFOR (米)	1969	温度計鞘管	温度計鞘管が Na 流れによる振動により疲労破損し漏洩	
Hallam (米)	1964	タンクノズル溶接部	隅肉溶接部にき裂が発生し漏洩	
FFTF (米)	1979	制御棒駆動機構	ベローズが破損し漏洩 (2 件)	
	1984	一次系電磁ポンプ導管	導管が腐食し漏洩	
SRE (米)	1969	一次系配管	ヒータの絶縁低下によるアーク放電によって配管に孔があき漏洩	
DFR (英)	1967	炉入口配管溶接部	二重管溶接部の欠陥より漏洩	
	1966	伝熱管過熱部溶接部	製作時の異物介在による溶接欠陥が原因で腐食が進み NaK が外部に漏洩	
PFR (英)	1974	再熱器フランジ部	容器と伝熱管バンドル間のフランジの締付けボルト、ナットの割れにより漏洩	
	1975	Nak/空気熱交換器配管	不明	
	1983	二次系配管 T 継手 溶接接合部	二つの T 溶接接合部にき裂が入り漏洩	
	1984	蒸気発生器水漏洩 検出配管	過熱により配管に過度の熱応力がかかり破損し漏洩	
	1986	再熱器入口配管 T 継手溶接部	溶接に欠陥が原因でき裂が入り漏洩	
	1987 ~1990	蒸気発生器過熱器 胴体溶接部	SUS321 材の「残留応力による遅れ破壊」により破損し漏洩 (3 回)	
SNR-300 (独)	1985	ダンプタンク溶接部	溶接部の水素脆化割れにより漏洩	
	1985	二次系 コルト・トラップ [®] 胴体	胴部、鏡部溶接部の溶接不良/水素脆化割れにより漏洩	
	—	計装案内管	操作ミスによる漏洩	
FBTR (印度)	—	制御棒駆動機構	—	

(つづき)

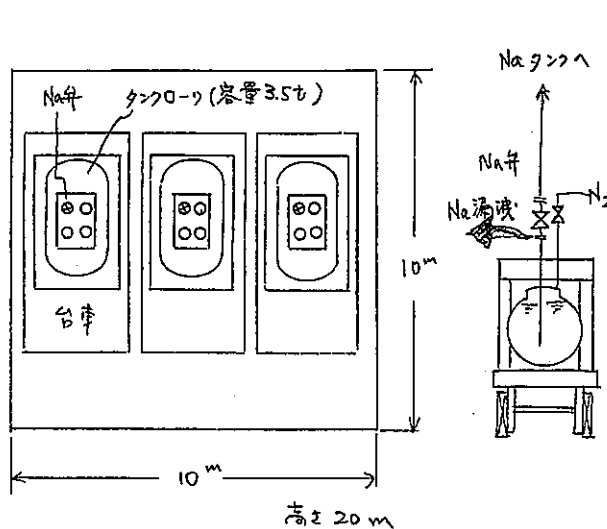
Rapsodie (仏)	1966	二次系 Na 注入配管	Na の詰った配管を加熱した際に、 Na が局所的に溶解され膨張圧が発生したため配管が破損し漏洩	
Phenix (仏)	1974	蒸気発生器再熱器 仕切弁溶接部	品質不良が原因で生じた溶接欠陥から漏洩	
	1986	純化ループ 熱電対取付部	異材溶接部の熱膨張差による割れ部からの漏洩	
	1977	制御棒駆動機構	ベローズが破損し漏洩	
	1985	蒸気発生器入口配管 T 継手溶接部	溶接不良による欠陥部から漏洩	
	1973	二次系補助配管 T 継手溶接部	溶接部に割れが入り漏洩	1 kg
	1992	水素計配管 T 継手	熱疲労により破損し漏洩	
	1992	小口径配管接続の二次系主配管溶接部	水素検出用の小口径配管を溶接した主配管部分に熱疲労により長さ 35cm のき裂が発生し漏洩	
	1993	二次系膨張タンク 入口ノズル部	3 系統すべての膨張タンク入口ノズル部が熱疲労により破損し漏洩	
	1993	二次系配管溶接部	SUS321 配管溶接部の経年脆化と溶接施工不適切により溶接部に生じた欠陥部から漏洩	
Super Phenix (仏)	1985	二次系主配管温度計	ウエルと管台のリップ溶接部が溶接不良及びカルマン渦との共振により疲労破損し漏洩	
	1987	炉外燃料貯蔵槽 溶接部	支持板溶接部に水素脆化及び溶接不良により割れが入り二重壁内に漏洩	20 数 t
	1990	二次系純化系配管 T 継手部	熱サイクル疲労により破損し漏洩	10 kg
BR-5 (旧ソ連)	1959	Na 弁	ベローズが破損し漏洩	
	1960	機械式ポンプ フランジシール部	シール部不良により漏洩	
	1960	空気冷却器 管－管板溶接部	溶接部に割れが入り漏洩	
BR-10 (旧ソ連)	1959	炉容器液位計配管	ヒータの絶縁低下によるアーク放電によって配管に孔があき漏洩	
BOR-60 (旧ソ連)	1971	熱電対シール部	シール部破損し漏洩	
	1971	Na 弁	シール部から漏洩	

(つづき)

BN-350 (旧ソ連)	1971/1977	Na 弁	加熱誤操作によりベローズが破損し漏洩 (同漏洩 10 件)	
	1972	電磁ポンプ導管	Na の詰った導管を加熱した際に、Na が局所的に溶解され膨張圧が発生したため導管が破損し漏洩	2~3 kg
	1976	蒸気発生器ドレン 配管 T 継手部	T 継手の溶接欠陥により 10~15mm φの孔があき漏洩	
BN-600 (旧ソ連)	1980	二次系ドレン配管 T 継手	製作上の傷が原因で割れが入り漏洩	
	1981	二次系ブロ-ダウン 配管 T 継手	継手に曲げ応力による集中荷重がかかり破損し漏洩	
	1982	水漏洩検出配管	弁閉止状態で配管を加熱した際に、Na が溶解され膨張圧が発生したため配管が破損し漏洩	
	1990	ベーパートラップ胴体	板厚不足 (設計 3.5 t → 実際 0.3 ~ 0.5 t) のため破損し漏洩	
	1982	一次純化系電磁ポンプ 入口レジューサ	製作時にあった欠陥が熱応力により大きくなり漏洩	
	1984	水漏洩検出配管 エルボ	予熱ヒータの絶縁低下によるアーク放電によって配管に孔があき漏洩	
	1984	水漏洩検出導波管	溶接部に欠陥があり漏洩	
	1988	二次系ダンプタンク ドレン配管エルボ	溶接部にあった欠陥が熱応力により大きくなり漏洩	
	1989	コールドトラップ 出口管 T 継手	製作時の溶接欠陥が運転時の変動負荷により成長し漏洩	
	1982	Na 弁	締付け過大によりシール溶接部にき裂が入り漏洩	
	1991	Na 弁	蒸気発生器配管弁のガスシール溶接部に欠陥があり漏洩	
	1991	Na 弁	再熱器弁のシール溶接部に欠陥があり漏洩	

表 2. 7 外国の蒸気発生器における Na-水反応事例

機 関	発生年	欠陥が生じた場所	事故の状況	備考
EBR-II (米)	1965	二重管蒸気発生器 水側伝熱管溶接部	水側伝熱管-管板溶接部にピンホールがあり二重管隙間に水漏洩	Na-水 反応なし
Enrico Fermi (米)	1962	No.1 蒸気発生器伝熱 管の支持部近傍 No.2 蒸気発生器 伝熱管湾曲部	45 本の伝熱管からリークし Na-水 反応。伝熱管と孔の間隙が大きすぎ たため流力振動による打撃と摩耗で 伝熱管が肉厚減少し破損して水漏洩 伝熱管湾曲部に残っていた洗浄残 液 (1/3NaOH, 2/3NaNO ₃) による応 力腐食による割れ発生	
	1964 ~1965	伝熱管-管板溶接部	No.1 蒸気発生器 (SG) 伝熱管 160 本、No.2 SG 伝熱管 270 本にき裂が 発生し Na-水反応。接合部に付着し ていた油や不純物による溶接欠陥	
KNK-1 (独)	1972	過熱部スぺーサ 溶接部	伝熱管からリークし Na-水反応。内 管のスぺーサフィン溶接部に 1.45 mm 2 の穴があき水漏洩	
PFR (英)	1974	伝熱管-管板 6 溶接 部	蒸発器 2 基、過熱器 2 基、再熱器 1 基に小リークが発生し Na-水反応。 製造時の溶接欠陥が溶接部の残留応 力により進展拡大し水漏洩	
	1987	過熱器内筒及び伝熱 管	伝熱管が流力振動により内筒に接触 し減肉したためき裂が発生。これが 原因で大リークが起り Na-水反応。	
Phenix (仏)	1982 ~1983	伝熱管-管板突合せ 溶接部	4 回小リークが発生し Na-水反応。 肉厚が厚くなっている溶接部付近に 発生した大きな熱応力による低サイ クル熱疲労破損による水漏洩	
BR-5 (旧ソ連)	1960	二重管型伝熱管	内管破損により環状部 (Hg が充填さ れている) に水漏洩。伝熱管蒸発部 に長さ 10~70mm のき裂発生。塩素 イオンによる SUS の応力腐食割れ	Na-水 反応なし
BN-350 (旧ソ連)	1973 ~1975	伝熱管溶接部	6unit 中 3unit で 5 回小リーク、2unit で 2 回大リークが発生し Na-水反 応。製造時の品質管理が不十分、溶 接部の欠陥が拡大し水漏洩	
	1989	伝熱管	伝熱管からリークし Na-水反応。水 質管理不良のため伝熱管が表面に沈 着した生成物により腐食され水漏洩	
BN-600 (旧ソ連)	1980	伝熱管母材部及び 溶接部	数回伝熱管からリークし Na-水反 応。伝熱管の母材部及び溶接部の微 少欠陥が運転中に拡大し水漏洩	



Na 温度 : 120℃

漏洩原因 : Na 弁と配管の継ぎ部分の
ガスケット取付が不良だった
ため、Na の昇温でコンテナの
内圧によって、Na がおしださ
れた

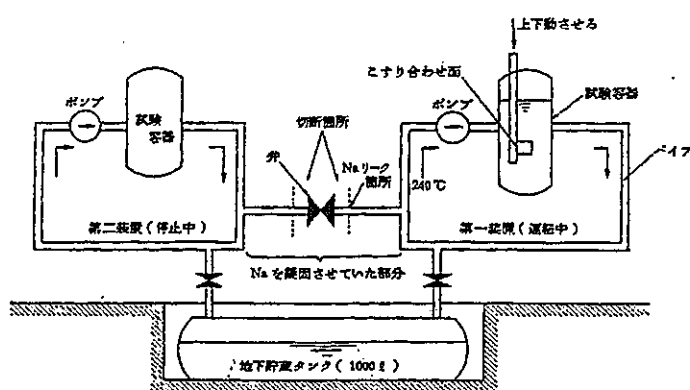
漏洩量 : 3.5 トン

消火作業 : ○ 粉末消火器による初期消火不可
○ 室内に N₂ ガスを送入したが機
密構造でなかったため消火不可
○ 大量の食塩を散布し消火

安全対策上に重要な知見 :

床のコンクリートが Na と反応し
ボロボロになった。コンクリート
保護壁が必要

図 2. 7 移動タンク貯蔵所接続配管からの漏洩 (日本)



Na 温度 : 240℃

漏洩原因 : Na 弁修理のためフリーズシール
していた配管内の Na が、高温試
験部からの熱伝導で温まり溶解し
て約 33 時間後に流出

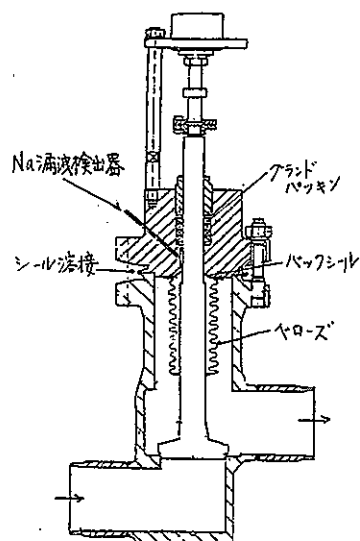
漏洩量 : 30 l

消火作業 : ナトレックス消火剤及び乾燥砂
消火時間 3 時間

安全対策上に重要な知見 :

Na 取扱の基本事項徹底

図 2. 8 Na 試験装置のフリーズシール配管からの漏洩 (日本)



漏洩原因：シールベローズの腐食及び過大な繰返し応力による疲労破壊

安全対策上の重要な知見：

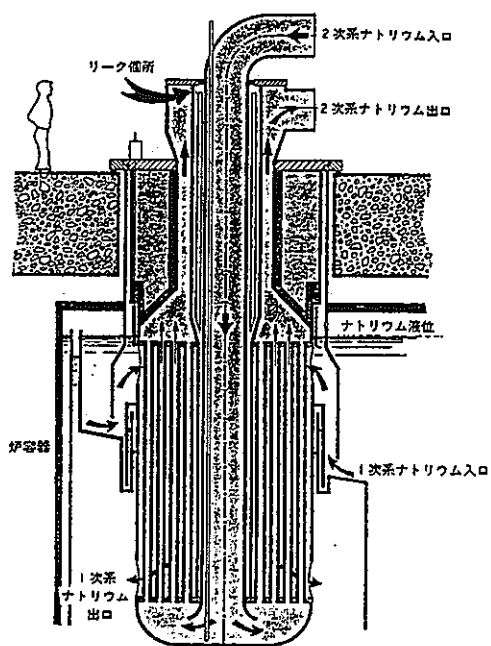
ベローズの最適設計

(材質、板厚、成型型、溶接型)

不純物精製可能な構造、

バックシール構造

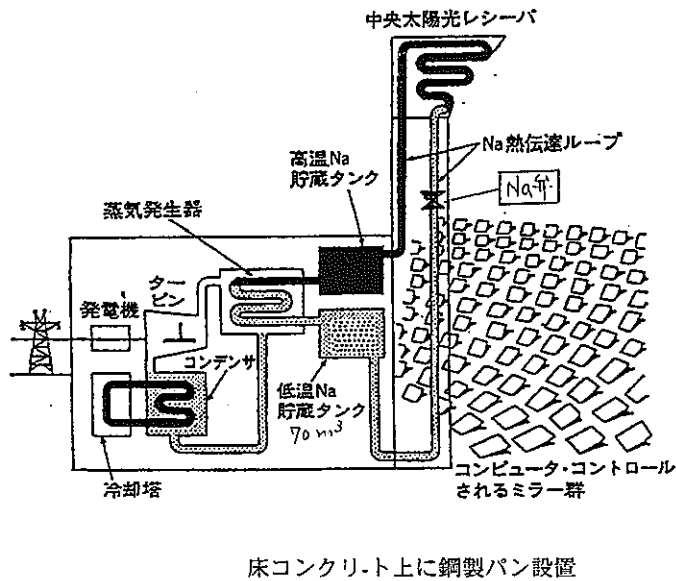
図 2. 9 Na 弁からの漏洩



漏洩原因：下降管と胴体の間の熱膨張差に基因する繰返し応力を受け疲労破壊
(上部プレート、入口の二重壁の下降管)

安全対策上に重要な知見：熱膨張差吸収構造

図 2. 10 中間熱交換器 Na 出入口二重管部の破損による Na の漏洩 (Phenix)



Na 温度 : 225℃ タンク圧力 : 5.1 bar
 漏洩原因 : Na 弁修理のため Na でフリーズシールしたつもりが、配管内の Na が固まっておらず、弁のフランジ開放によって Na 噴出

漏洩量 : 15 m³、スプレイ燃焼時間約 30 分

漏洩停止操作 : タンクの圧力開放不可 (ガス弁に電源が供給されていなかったため、緊急電源を起動したが、すでに機器が損傷しており漏洩停止は不可)

消火作業 : GRAPHEX 消火剤で消火
 消火時間 2 時間

安全対策上に重要な知見 :

スプレイ火災温度

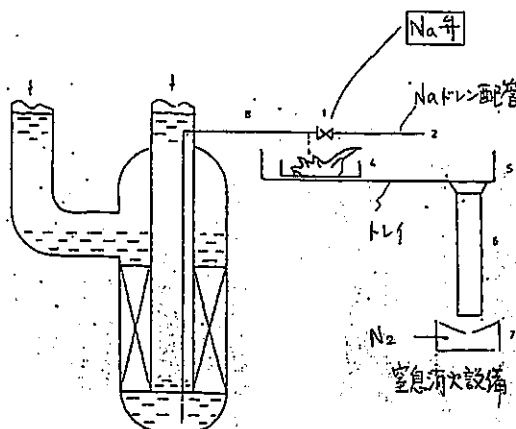
スプレイ直下 1~3 m 1450℃

スプレイ中心の周囲 1100℃

スプレイの境界領域 620℃

圧力開放システムの重要性

図 2. 1 1 太陽熱発電の集光器とタンク間の Na 配管からの漏洩 (アルメリア)



Na 温度 : 740℃ (燃焼時)

漏洩原因 : Na 弁交換のため Na でフリーズシールしたつもりが、配管内にガスがたまっていてシールされなかったため配管を切断したら Na が流出

漏洩量 : 燃焼量は 16 kg
 燃焼しない分の Na は金属トレイ上に溜まった

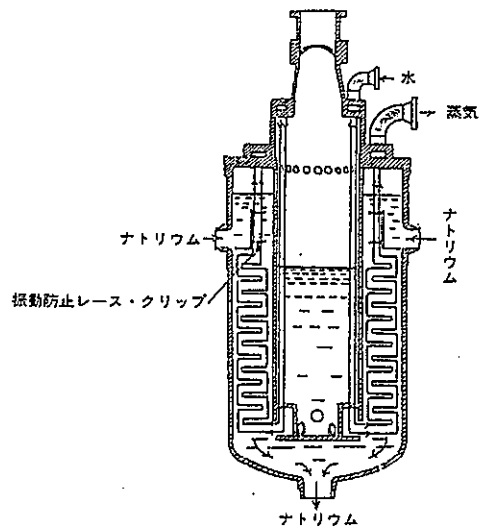
消火作業 : 粉末消火剤で消火

消火時間 9.5 時間

100 m³ 容量の窒息消火設備があったが漏洩量が少なかったため使用せず

安全対策上に重要な知見 : トレイの効果

図 2. 1 2 中間熱交換器二次系ドレン配管からの Na 漏洩 (BN-600)



- 漏洩原因：(1) 組み立て作業中に用いた洗浄液
($3/1 \text{ NaOH}$, $3/2 \text{ NaNO}_3$) が完全に
排出されなかったため伝熱管湾曲部
に応力腐食割れ発生
- (2) 伝熱管が Na の流れのため振動し、
伝熱管と支持板との間隙が大き過ぎ
たため打撃と摩耗で肉厚が薄くなり
水側の高圧によって破損
- (3) 管－管板接合部の溶接欠陥による割れ
- (4) 管板リガメントのクラック
- (5) 伝熱管水側内面のピitting

安全対策上の重要な知見：

- (1) 管板の構造設計
- (2) 洗浄液の除去
- (3) 管内の水質管理

図 2. 1 3 蒸気発生器の応力腐食と水漏洩 (Enrico Fermi)

2.3 利用施設の安全対策調査

2.3.1 化学工業における安全対策

液体金属の利用施設や一般化学工場における安全対策について調査し、その情報を集約することを目的に一般化学工場として九州に主たる根拠地のある大手化学メーカー3社を訪問した。訪問したのは三菱化学工業株式会社黒崎事業所、日鉱金属株式会社佐賀関製錬所、旭化成工業株式会社薬品工場及び東海工場である。以下各工場ごとに調査内容を記す。

§ 1. 三菱化学株式会社黒崎事業所

(1) 立地

三菱化学黒崎事業所は、北九州市八幡西区の洞海湾に面した一面に、ほぼ2km×1km、約190万m²（約57万坪）の広大な敷地面積を有する日本屈指の総合化学プラントである。北九州市は、昭和38年に門司、小倉、戸畑、八幡、若松の5市が合併して生まれ、その人口は約100万人であることから、労働力に恵まれている。また、洞海湾は天然の良港であり、工業原料や製品の海上輸送にとっても有利である。さらに、工業用水については、水量豊富な遠賀川が近くを流れており、これが利用可能である。

このような良好な立地環境のもと、北九州市には三菱化学黒崎事業所の他、新日本製鉄、住友金属、旭硝子、黒崎窯業、三井ハイテック、ゼンリン、三菱マテリアル、安川電機、東陶等の著明な国内メーカーの工場が操業している。

(2) 事業所の操業状況と主要製品

昭和10年の創業当初は、石炭を原料とした炭素製品を主に生産していたが、時代の流れとニーズの変化に伴い、それまでのマス型化学プラントから農薬や医薬中間体、合成繊維、プラスチック、液晶のカラーフィルター等を主製品とする機能型、加工型化学プラントへと変化してきている。このため、自社で保有していた石炭を原料とするコークス炉は平成9年に廃止・撤去され、代わりに隣接する新日本製鉄より天然ガスの供給を受けている。また、電力について

は事業所内に重油燃焼発電所と石炭火力発電所が合計3基あり、高さ170mと190mの集合煙突がひときわ高くそびえているが、訪問当日はこのうちの1基のボイラーがトラブルを起こしたため、この影響で事業所の全プラントが停止状態にあって製造現場の見学はできなかった。工業用水については、日量63,000tonの水を使用するが、そのうちの5%を遠賀川から取水し、残りの95%については近くの瀬板貯水池を利用したリサイクルで賄っている。

製品は、60%が船舶で、30%が車で、残りの10%が鉄道で、それぞれ出荷されている。事業所で働く社員は約1,900名、関連会社を含めた全従業員は約5,000名であるが、製造工程のコンピューター化によって減少しているとのこと。尚、現場は4班3交代の直運転で、24時間操業である。

主要製品については以下のとおりである。

医薬・農薬・電解関連：工業塩を原料とする医薬中間体、農薬、工業塩とスチレンモノマーを原料とするイオン交換樹脂等

炭素・無機関連：クレオソート油の熱分解によって製造するカーボンブラック、塩化カリとリン安を原料とする肥料、ナフサとLPG及びシクロヘキサンを原料とするアンモニア系薬品の他、ドライアイス、液化炭酸等

合繊繊維原料他：パラキシレンやシクロヘキサンを原料とするテレフタル酸やカプロラクタムなどの合繊繊維原料、アクリロニトリルを原料とするアクリルアמיד（紙力増強剤）とポリアクリルアמיד（高分子凝集剤）

機能商品：シクロヘキサンやビスフェノールAを原料とするナイロン樹脂やポリカーボネート樹脂（エンジニアリングプラスチック）、ノボラック樹脂と感光剤を原料とするフォトレジスト（半導体製造薬品）等

(3) TPM (Total Productive Management) 活動

自主保安活動の一環として導入し、事業所全体で取り組んで成果を上げている活動である。このような活動を導入した背景としては、事業所を取り巻く環境の変化（品質向上、コスト低減要求の増大や競争の激化、都市に密着した立地環境を考慮して保安・安全・環境

意識の徹底を求められている」と、事業所としての問題点（設備劣化の進行やトラブルの多発、手作業・3K作業が多いという設備面、知識・技術中心の教育でスキルが減退、高年齢化、やる気の風土の減退という人的面、売上高や収益の悪化、利益至上主義による安全や設備保全に対する過小評価、効率化の遅れ、重い・遅い・固いという事業所イメージなど）があった。これらの改善に取り組むために当初は5S活動を展開していたが、その成果がいま一つ芳しくなかった。このため、1994年からTPM活動を導入して1997年までパート1を行ない、2001年までをパート2として今日に至っているとのことであった。

TPM活動は全員参加の生産保全活動であり、その特徴は、生産効率を最高にするため、全てのロス（安全・設備・品質等）を未然に防止し、全部門（製造・エンジニアリング・開発・業務・管理他）にわたって、全員（従業員・関係協力会社）が参加し、重複小集団活動によってロス・ゼロを達成するところにある。

パート1では、運転員自らが不具合を発見し改善するための自主保全に力点を置き、設備に強い人づくり、自分の設備は自分で守る体制づくり、設備を通して人の意識と行動を変えようという3つのねらいのもとに活動が展開されたようである。方法としては、まずは運転員や設備等の悪さ加減を徹底的に抽出するために、叱るよりも寧ろ誉めることで全ての問題点を申告させることから始まっている。この結果、軽微なトラブルが多いためにスタッフ本来の機能が果たせていないこと、知識偏重教育の弊害としてオペレーターや保全員のスキルが脆弱であることが明らかとなり、これを解決するための独自の人材育成システムが構築されている。今回の調査では、この一環としての設備教育を行なうための「たくみの館」を見学させていただき、その設備保全技能伝達教育のしくみを知ることができた。これらの活動の成果は、トラブル数の激減ばかりでなく、国家資格であるところの機械保全技能士（機械・電気）の有資格者が435名に昇っていることでも明らかと感じた。

パート2では、パート1の活動をさらに発展させるべく、「プラントルネッサンス活動 2001-都市型事業所への更なる変革-」の実現を目指している。都市型事業所とは、COMPETITIVE（競争力）、CLEAN

(クリーン)、CREATIVE (創造力) の 3C を基本とした都市と共生する生き生きとした事業所とのことである。活動は、生産革新、技術革新、経営革新、人材育成、環境革新の 5 つの専門部会のもと、各部会に 3 つないし 4 つの分科会チームを設けておこなっている。このうち、生産革新部会の保全革新分科会活動について、担当する設備技術部から詳細な説明を受けた。ここで特徴的だったのは、それぞれの設備や機器について重要度分類を行ない、これに基づいた検査の内容や周期を決めているところであった。

(4) RC (Responsible Care) 活動

環境・安全に係わる三菱化学独自の活動であり、安全文化の醸成という点で前述の TPM 活動ともリンクさせている。三菱化学黒崎事業所は、多種多様な化学物質を取扱っているため、特に「環境保全と環境改善は企業の使命」であるとの環境安全理念を有している。このため、TPM 活動のパート 2 では、都市型事業所を目指す黒崎事業所にとって環境負荷の削減、管理レベルの向上は不可欠として、ISO-14001 の認証取得を目指しているとのことであった。尚、事業所見学の際に、敷地内に大規模な活性汚泥処理設備が見受けられる等、その活動の一端を垣間見ることができた。

(5) 質疑応答および感想

以上のような説明及び事業所見学を終えた後、各委員より種々の質問が出された。例えば、生産ラインをストップさせないために、誤報の多いアラームのスイッチを切ることはないか、アラームが鳴ってもスイッチを切って無視することはないか、トラブル隠しは無いか等、現場でありがちなことについては、従業員の危機管理意識の徹底と不具合を積極的に申告させる制度の定着によって絶対に無いとの回答であった。

また、オペレーターの意識や専門領域化された職種は、世代交代やコンピュータ化に対してどのように対処するかについてや、TPM 活動の費用対効果についての質問もあり、前者については「たくみの館」等を利用した技能伝達教育で、後者については費用は売り上げの 1～3% で決して安くはないが、まずは事故・トラブルを起こ

さないことが重要との認識とのこと。

その他、廃棄物のゼロ放出は果たして可能か、コンピュータのハッカー対策はどうするか、TPM 活動と PL 法との関係等につき積極的な意見交換がなされた。

最後に、感想として、現場の安全はトップの決断と診断が重要であり、これを可能とする組織・体制のシステム作りと全員参加の土壌を育てることが肝要との印象を持った。このような点から、多種多様な危険物を大量に扱う巨大プラントにおいて、TPM 活動は非常に有効であると感じた。

§ 2. 日鉱金属株式会社佐賀関製錬所

(1) 立地

金属の製錬所は原料の採掘場所の近くにあるのが自然であるが、銅鉱山が近くになく九州の佐賀関になぜ銅の製錬所があるのかとまず疑問が沸くが、このことについて佐賀関製錬所長から次のような説明があった。

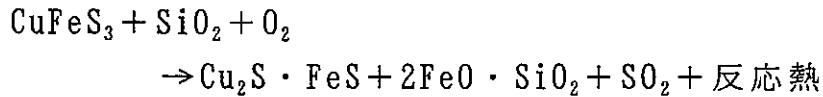
そもそもこの製錬所のルーツは日立鉱山で、当時は製錬で発生する SO_2 を H_2SO_4 に固定する技術がまだ無く、畑を枯らすなどの公害が発生していた。当時の公害対策は製錬所を移転することであった。また一方、瀬戸内海に複数の銅鉱山があり一つ一つは非効率的で一ヶ所に集めるの必要もあり、佐賀関が佐賀関半島のほぼ先端に位置し、 SO_2 が薄く広く拡散し海洋に落下することで公害回避できることから選ばれた。

(2) 製錬事業

銅の製錬量では年産 45 万トンで単一製錬所では世界最大の生産量である。かつてはニッケルや鉛も事業化していたが今は銅事業に専念している。

銅原料は大型鉱石船でチリなどの海外の各地から粉体（銅精鉱）で輸入し、原料受け入れバースで受け入れ、銅精鉱貯鉱舎で貯蔵される。貯鉱舎の貯蔵能力は 10 万トンである。銅精鉱はドライヤで乾燥されたあと常温高酸素空気とともに自溶炉に吹き込まれる。銅精

鉱はバーナを出ると瞬時に酸化反応を開始し、鉱石自身の酸化熱により銅品位 60%のマットならびに酸化鉄と珪酸からなるスラグとに溶解・分離される。この自溶炉内反応は次のように化学式になる。



CuFeS_3 : 銅精鉱

SiO_2 : 珪酸

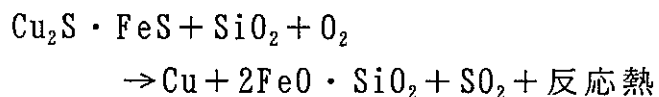
O : 酸素

$\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{FeS}$: マット

$\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$: スラグ

SO_2 : 亜硫酸ガス

自溶炉で生成したマットは転炉に輸送され、転炉内で酸素添加空気を吹き込んで 99%の粗銅とケイ酸系酸化鉄を形成する。この転炉内の反応は次のように化学式になる。



$\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{FeS}$: マット

SiO_2 : 珪酸

O_2 : 酸素

Cu : 粗銅

$\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$: スラグ

SO_2 : 亜硫酸ガス

10万トンの鉱石から5万トン of スラグが発生する。スラグはセメント会社に添加使用してもらっているが消化しきれず、現在は50万トンが工場内部に残留している。

粗銅は精製炉でブタンガスを吹き込み酸素を除去し、アノード(陽極板)に鑄造する。アノードは1枚が280kgあり、この製造法は連

続鑄造機、即ち、回転する円形テーブルの上に鑄型を並べその鑄型に溶融した粗銅を流し込み鑄造する。電解工場においてアノードを $270\text{A}/\text{m}^2$ で電気分解することにより銅品位 99.99 パーセント以上の電気銅になる。

電解の際に、電位の高い貴金属を含む沈殿物が電解液の底部に沈殿するので、回収し、金、白金、パラジウムも副産物として生産している。

電気銅は客先の要求に従って丸棒などに加工する。これを電線メーカーなどが更に加工して最終製品になる。ただ送電線は超高压線はアルミ被服と鉄心になり、ラジエーターもアルミになるなどしてマーケットがかってより縮小している。国内の銅需要は年間 220 トン程度。150 トンが国内生産。残りは輸入。国内の銅生産メーカーとしては、他に住友金属鉱山、同和鉱業、三菱マテリアル、三井金属などがある

(3) 事故例や安全対策など

事故例としては多くは聞けなかったが、本年（平成 11 年）に回転体に巻き込まれた事故が発生したとのことである。また安全対策として、各炉において溶融金属冷却用の水を大量に使っているが、水蒸気爆発に対する対策として炉の底部に冷却配管を設置しないなどの処置をしているとのことであった。安全教育としては入社時と各課基準の教育を年 2 ～ 3 日行っている。グループ改善活動が活発で外部の人の指導も受けたとのこと。内部よりも外部からの指導ほうが徹底しやすいという面がある。

(4) 感想

訪問日の前日に銅製錬の主要設備である自溶炉にトラブルがあり見学できなかった。これは前日の三菱化学でもあったがやはり突発的な事故はどうしても避けられないということであろう。従ってトラブルは起こるという前提で、起こった時にどう対応するかを事前にできる限り検討しておくことが大切であると考える。

§ 3. 旭化成工業株式会社 薬品工場及び東海（とうみ）工場

(1) 工場の生い立ち

薬品工場は宮崎県延岡市にあり、大正12年に世界で最初に空気中の窒素固定によるアンモニア合成法の工業化に成功し、ここに工場を建設したことに始まる。その後、このアンモニアの有効利用を考え、昭和5年にベンベルグ工場を建設し、以来次々に有機的なつながりを持つ工場群が建設された。延岡地区は旭化成工業株式会社の主力工場が集まる重要な位置を占めているおり、現在は薬品、東海、レーヨン、不織布、アラミカ、ベンベルグ、エステル、ハローファイバー、プラノバ、延岡医薬、サラン、レオナ、雷管の13工場が化学コンビナートを形作っている。

東海工場は薬品工場の東北方向に約10km離れた場所にあり、周りは広大な保安林に囲まれている。東海工場は薬品工場で生産された硫酸、硝酸の有効利用を目指し、昭和5年に作られたダイナマイト（主要原料が硫酸と硝酸でグリセリン処理したニトログリセリンである）の製造工場からスタートした。

(2) 事業内容

薬品工場では硝酸、肥料、苛性ソーダ、塩素、塩酸等の無機工業薬品のみならず綿薬及びイオン交換膜法食塩電解フッ素系ポリマー等も製造している。今回の調査では薬品工場の塩素および苛性ソーダの製造プランとを見学した。

東海工場はダイナマイトのほかに現在は含水爆薬と硝油爆発も製造している。ここ東海工場の中に火薬の爆発施設を持っており、爆破と評価が行われる。今回の調査では爆破試験を見学した。

(3) 事故例や安全対策など

薬品工場は塩素系の製品の外販では九州地区のナンバーワンの実績を示すなど、原料や用役を供給する重要基幹工場でひとたび止まると多方面に影響することから工場の保安防災活動は生産活動そのものとの認識がある。また、立地が市街地であるため製造している危険性のある塩素ガスが万一漏洩でもすれば地域住民への影響は計

り知れない。こうした背景があることもあり安全衛生及び保安面からいろいろな活動が展開されてきた。

回顧的にみれば、安全衛生及び保安面からのいろいろな活動における基本的な流れがある。即ち、時代の社会情勢に応じて一つのフレームが設定され、そのフレームを全員で達成していく実践活動が行われてきたという流れである。1970年代前半はコンビナートの事故多発に対してフレームの構築として、コンビナート等保安規則・石油コンビナート等災害防止等の法・システム・指針の整備がなされた。各工場はそれに沿った形で規則・基準の見なおし、保安設備の充実化さらに教育・管理組織の整備が行われた。1980年代にはY K Z（薬品工場故障ゼロ運動）、K Y（危険予知運動）、H H K（ひやりはっと気がかり）等の小集団活動が進められた。これらは成果があがり事故の減少を見たが一方では管理者が小集団活動に頼りきりになるなど活動の停滞が生ずるに至った。1990年代の新たな情勢の変化としてISOに代表されるグローバルスタンダード化や認定事業者制度など自己管理自己責任原則が打ち出されくるとともに失敗が許されないという状況になってきている。

昭和55年に塩素漏洩トラブルがあり、それ以来、安全のフレーム作りとして技術力の向上を掲げ、「有害物を漏洩させない対策」および「災害ポテンシャルのミニマム化」という観点で工場を挙げて取り組んでいる。「塩素を漏洩させない対策」としては、塩素設備の密閉化、配管材料の強化、屋外液体塩素配管のノーフランジ化、配管の外部腐食対策など塩素を漏洩させない設備作りや配管類の点検基準の整備、さらには地震インターロックの設置などを行った。「災害ポテンシャルのミニマム化」としては基準（内規）の整備やガス拡散シュミレーションを行い自動液抜き装置や水膜設備の設置し対策をとっている。以来約20年無事故無災害を継続中である。

最近（平成7年から）では「自然と調和した工場環境」という目標を掲げ、排水溝における鯉・亀の飼育、工場周辺における果樹・花木の栽培、蛍の放流などを行っている。実効というよりはクリーンなイメージ作りに役立ちそうである。

東海工場においては爆薬生産工場敷地内にある試験場及び試験工程を見学した。爆薬を取り扱っているだけあって、一般住民が居住

する領域との間に広大な保安地域を確保している他、製造工程や貯蔵施設が全て土塁に囲まれているなど安全設備にも特徴が見られた。特に、土塁構築や区画の仕方、及び爆破試験場の配置に、自然の地形を巧みに利用している点が印象的であった。爆破試験について、実演を見学した。

(4) 感想

K Y Z 活動や H H K ・ K Y 活動などの小集団活動などを行いながら、技術力の向上という観点から有害物を漏洩させない設備作り、基準・規則の整備やガス拡散シミュレーション等の実施しつつ、更には安全巡視を行うなどの木目細かな諸業務を行うことにより安全性の確保をしてくれている。歴史が長く地域に密着した工場となっていることまた親子代々旭化成に勤務する従業員が多いことなども意識向上に役立っているとも考えられる。実際に漏れれば回りは住宅地であるから影響が出るのは避けられないであろうが上記のように木目細かな活動と高い意識とが安全を保っている源であるとの感じを受けた。最後に強調された言葉「安全は技術で裏打ちされた環境の下で、人が懸命に努力して、やっと確保できるものである。」がそれを物語っている。

§ 4 . 化学工場の安全対策の総括

日本の代表的な化学会社の工場を訪問しそこでの安全管理について調査した。訪問した3工場のうち2工場でたまたまトラブルによる一部プラントの緊急停止に遭遇した。このことは工場の運転上突発的なトラブルは必ずおきるという事実を我々に示している。しかし、両工場とも何らの問題もなく整然とトラブルの処理、プランとの再運転に向けてのアクションがとられていた。これはトラブルを未然に防ぐことに全力をあげながらも、一方では万一トラブルが起きた時にどのように対処するかという指示が明確であるとともに、日常の訓練が行き届いていることを示している。

工場の安全操業は会社経営の最重要課題であるという意識が経営トップから現場の第一線の人たちまで浸透している。(いわゆるレ

シボンシブル・ケア) 特に工場においては日々プラントを運転している現場の課長以下運転員の人たちの能力が鍵を握っている。そのためにあらゆる角度からの教育が重視され実行されている。教育の内容としては安全マニュアルの徹底や実地教育などがあり、そのための投資も十分行われている。万一事故が起きたときの対応については運転員の訓練の他安全装置の整備が常に行われている。しかし、絶対な安全なプラントはない。重要なことは万一の事故の時に、まずプラントを停止し外部への被害を最小にすることである。従って、各工場の担当者に「もし安全装置が作動しなかったら」「もし検知機がうまく働かなかったら」と言う質問を続けると、必ず現状ではここまでしかできないという返事が帰ってくる。これは化学工業が100年以上にわたり地域の人たちと共存してきた歴史的な背景に加え、日常的な地域の人たちへの情報公開や工場見学などの努力の積み重ねによるものと言えよう。

原子力開発の場合、安全性については、原子炉特有の問題、発電装置としての問題、ナトリウム漏洩のような化学工業的な問題、その他、などに分類しそれぞれの安全管理や事故時の対応などを分けて考えることが必要であろう。そしてそれぞれについて①基本的な技術改良、②運転技術の向上、③保守点検技術の向上、④正しい情報の公開などを行う必要があると思われる。

第3章 化学挙動評価研究

3.1 化学的データの収集

液体金属の空気や水分に対する化学的安定性および保持材料に対する化学的安定性を討議し、その安定化に向けた検討を行うために必要な物性値や化学的特性等に関するデータの知見をデータソースとして既存商用データベース等を用いて検索収集する。対象金属と調査する物性を決め、主に化学研究会委員が分担して文献検索を実施した。液体金属の基礎化学調査研究として有益な文献データを抽出し、最終的にはアブストラクト集を目指す。

3.1.1 収集方法

調査対象物質とそれらの物性、データソースおよび抽出方法を次のようにした。

(1) 対象物質と物性

対象物質：Li、Na、K、Na-K、Mg、Zn、Hg、Al、Ga、Sn、
Pb、Pb-Li、Pb-Bi、Bi（以上14物質）

物性：

- ① 燃焼機構
- ② 反応エンタルピー、比熱
- ③ 状態図
- ④ 活量
- ⑤ 混合のギブスエネルギー、エンタルピー、エントロピー
- ⑥ 溶解度
- ⑦ 酸化物や水酸化物の標準生成ギブスエネルギー
- ⑧ 拡散係数、熱伝導度、熱拡散率
- ⑨ 粘性係数
- ⑩ 電気化学的データ（電極電位、腐食電位、電極反応速度等）
- ⑪ 液体金属の構造・電子論

(2) データソース

1970年以降のデータ：JICST、STN、JST (NUCLEN)、単行本等
1970年以前のデータ：Chemical Abstract から検索

(3)抽出方法 (図 3.1)

- ①対象の物性に対して抽出作業担当者を決定する。
- ②上記データソースから上記の物質と物性をキーワードとして検索し、該当するデータ数を調査する。
- ③データ数が 3,000 以下となるような検索キーワードを採択し、文献タイトルを抽出する (以下、タイトル抽出という)。
- ④文献タイトルから文献アブストラクトを抽出する必要があるか 1 次スクリーニングする (以下、アブストラクト抽出という)。
- ⑤文献アブストラクトを読み、アブストラクト集に載せるかの 2 次スクリーニングする (以下、アブストラクト採用という)。

3.1.2 収集結果

表 3.1 に文献検索の結果を整理して示す。

(1) 抽出進捗状況

- ① 全ての物質と物性について適切な検索キーワードを採択し、文献タイトルを全て出力した。
- ② 状態図、溶解度、腐食・質量移行については、文献タイトルから文献アブストラクトを抽出する 1 次スクリーニングを終了した。
- ③ 燃焼機構、酸化物・水酸化物の標準ギブスエネルギー、電気化学データ (電極電位、腐食電位、電極反応度など) については、文献アブストラクトから 2 次スクリーニングを終了した。

(2) 検索結果

- ① タイトル抽出結果の文献数としては、混合ギブスエネルギー (全 9 件)、熱拡散率 (全 15 件)、電子・構造論 (全 15 件) が特に少ない。
- ② 2 次スクリーニング (アブストラクト採用) を終了した文献数では、ナトリウム (全 69 件) が最も多く、次ぎにアルミニウム (全 37 件)、リチウム (全 27 件) となり、水銀 (全 6 件) が最も少ない。
- ③ アブストラクト採用を終了した燃焼機構について検索結果を以

下に示す。

各種液体金属の燃焼機構に係わる文献調査にあたっては、まずは燃焼研究の専門誌を対象とすることとし、主として国際的な燃焼研究の学会である The Combustion Institute と日本燃焼学会のそれぞれのインターネット・ホームページ(<http://ivory.lm.Com/combust/index.html> および [http:// wwwsoc.nacsis.ac.jp/csj2/csj-j/index.html](http://wwwsoc.nacsis.ac.jp/csj2/csj-j/index.html)) にアクセスして、提供されている検索機能を用いて調査対象元素名をキーワードに検索を行った。

前者のヒット数は数百件から数千件（燃焼以外のものも含まれる）であったため、さらに絞り込みを行うべく「燃焼」、「火災」といったキーワードを追加して検索を行ったが、検索機能がうまく働かず、結果的にはタイトルを目で追いかけることにより数件から数十件に絞り込んだ。後者は十数件であった。

該当文献の掲載誌は、以下のものに集約された。

- 1) The First Symposium (International) on Combustion, 1956 ~ The Twenty-sixth Symposium (International) on Combustion, 1998 (The Combustion Institute 主催の国際燃焼シンポジウム講演論文集)
- 2) Combustion and Flame (The Combustion Institute の定期刊行学術誌)
- 3) Combustion Science and Technology (英国燃焼学会の定期刊行学術誌)
- 4) AIAA Journal (航空宇宙学会の定期刊行学術誌)
- 5) 第 1 回燃焼シンポジウム講演論文集～第 37 回燃焼シンポジウム講演論文集 (日本燃焼学会主催の燃焼シンポジウム講演論文集) 尚、これらから抽出した論文は、その大部分がアルミニウムとマグネシウム、リチウムの燃焼研究に係わるものである。

以上の調査結果を概観してみたところ、リチウムとカリウム、ナトリウムのアルカリ金属の燃焼については、核融合炉や高速炉の冷却材としての利用について行われた安全研究の一環としての燃焼研究の成果の大部分が含まれていないことが判明した。そこ

で、過去に開催された以下の国際会議の論文集をサーベイすることにより、アルカリ金属の燃焼研究についての多数の論文を抽出した。

(1)液体金属の利用技術に係わる国際会議

- 1) Proceedings of the International Conference on Liquid Alkali Metals, Nottingham Univ., April 4-6, 1973.
- 2) Proceedings of International Conference on Liquid Metal Technology in Energy Production, Chanpion, Pennsylvania, May 3-6, 1976.
- 3) Proceedings of Second International Conference on Liquid Metal Technology in Energy Production, Richland, Washington, April 20-24, 1980.
- 4) Proceedings of an International Seminar on Liquid Metal Systems - Material Behaviour and Physical Chemistry in Liquid Metal Systems, Karlsruhe, Germany, March 24-26, 1981.
- 5) Proceedings of the Third International Conference on Liquid Metal Engineering and Technology, Oxford, April 9-13, 1984.
- 6) Proceedings of the Fourth International Conference on Liquid Metal Engineering and Technology (LIMET'88), Avignon, France, October 17-21, 1988.
- 7) Proceedings of an International Seminar on Liquid Metal Systems - Material Behaviour and Physical Chemistry in Liquid Metal Systems 2, Karlsruhe, Germany, March 16-18, 1993.

(2)高速炉等の安全性に係わる国際会議

- 1) Proceedings of the FAST REACTOR SAFETY MEETING, Beverly Hills, California, April 2-4, 1974.
- 2) Proceedings of the International Meeting on FAST REACTOR SAFETY AND RELATED PHYSICS, Chicago, Illinois, October 5-8, 1976.
- 3) Proceedings of the International Meeting on FAST REACTOR

- SAFETY TECHNOLOGY, Seattle, Washington, August 19-23, 1979.
- 4) Proceedings of the L.M.F.B.R. SAFETY TOPICAL MEETING, Lyon, Ecully France, July 19-23, 1982.
 - 5) Proceedings of the International Topical Meeting on FAST REACTOR SAFETY, Knoxville, Tennessee, April 21-25, 1985.
 - 6) Proceedings of an International Conference on Science and Technology of FAST REACTOR SAFETY, Guernsey, May 12-16, 1986.
 - 7) Proceedings of the 1990 International Fast Reactor Safety Meeting, Snowbird, Utah, August 12-16, 1990.
 - 8) Proceedings of International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles (FR'91), Kyoto, October 28-November 1, 1991.
 - 9) Proceedings of International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants (ANP'92), Tokyo, October 25-29, 1992.
 - 10) Proceedings of ARS'94 International Topical Meeting on Advanced Reactors Safety, Hyatt Regency, Pittsburgh, April 17-21, 1994.

また、リチウムとナトリウムについては、これら国際会議における発表論文の他、担当者の記憶等に基づく以下の学術誌や学会誌に掲載されたものについても抽出している。

- 1) Nuclear Technology
- 2) Fusion Technology
- 3) Nuclear Engineering and Design
- 4) Progress in Nuclear Energy
- 5) Journal of Nuclear Science and Technology
- 6) 日本機械学会論文集
- 7) 日本火災学会講演論文集
- 8) エネルギー・資源
- 9) 安全工学
- 10) 火災

リチウムについてはこれらの他、各研究機関が単独で公開した報告書についても抽出したが、ナトリウムについてはその数は膨大であり、またその成果の多くは上記調査で抽出した公開論文に含まれていると考えられるため、今回の調査対象からは除外した。また、ナトリウムの燃焼に関しては、以下の IAEA(International Atomic Energy Agency) /IWGFR (International Working Group on Fast Reactors)の専門家会議がこれまでに5回開催されているが、これらで発表された論文についても同様の理由から除外している。

- 1) Summary Report of Meeting of Specialists on SODIUM COMBUSTION AND ITS EXTINGUISHMENT -- TECHNIQUES AND TECHNOLOGY, Richland, Washington, IAEA-NPR, May 22-25, 1972.
- 2) Summary Report of Specialists' Meeting on SODIUM FIRES AND PREVENTION, Cadarache, IWGFR/28, November 20-24, 1978.
- 3) Summary Report of Specialists' Meeting on SODIUM FIRES DESIGN AND TESTING, Richland, Washington, May 24-28, 1982.
- 4) Summary Report of Specialists' Meeting on SODIUM FIRES, Obninsk, IWGFR/67, June 6-9, 1988.
- 5) Summary Report of Technical Committee Meeting on Evaluation of Radioactive Materials Release and Sodium Fires in Fast Reactors, O-arai, IWGFR/92, November 11-14, 1996.

以上の調査結果とまとめると次のようになる。まず、論文の抽出件数は、アルミニウム：27件、ビスマス：該当なし、リチウム：15件（うち1件は論文未入手）、鉛、鉛-ビスマス：該当なし、ガリウム：該当なし、マグネシウム：15件、水銀：1件（論文未入手）、亜鉛：該当なし、スズ：該当なし、カリウム：2件、ナトリウム：76件である。また、その内容を概観すると、アルミニウムとマグネシウムは、火星や金星等の二酸化炭素大気におけるロケット推進用燃料としての燃焼研究がその主たる目的で、リチウムも一部これに該当する。一方、リチウム、カリウムおよびナトリウムのアルカリ金属は、核融合炉のブランケット燃料を兼ねた冷却材（リチウムとその合金）と高速炉の冷却材（主にナトリウム）に利用されることから、その安全性評価の観点から漏えい時の燃焼挙動に着目した研

究が行われている。今回の調査で該当する論文を抽出できなかった金属については、恐らくそのほとんどが燃焼しないか、利用を含めた工学的観点からの燃焼研究目的が乏しいためと考えられる。

3.2 活性抑制金属の可能性検討

3.2.1 活性抑制金属の可能性について

(1)液体金属が空気あるいは空気中の水分と反応する事を抑制する場合

① 液体金属を空気あるいは空気中の水分から遮断する方法例えば、Na-Al 合金を取り上げよう。Na と Al は相互に溶解度が非常に小さく、Al の融点まではほとんど解け合わない。Al の融点 660℃以上では 2 相分離しており、溶解度は少し増大する。800℃では 1 %程度 Na に Al が溶解する。一方、酸素と反応すると、 Na_2O 、 Al_2O_3 およびそれらの化合物、1:1, 1:6, 1:11 が生成する。 $\text{Na}(\text{liq.})$ と $\text{Na}_2\text{O}(\text{sol.})$ 、 $\text{Al}(\text{liq.})$ と $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{sol.})$ はそれぞれ平衡するので、Al の融点 660℃以上での Na-Al-O 系状態図を推定すると図 3.2 のようになる。

すなわち、Na 中の Al 濃度が増加するに従い、順に 1:1, 1:6, 1:11 の化合物が生成する。これらの化合物は Na_2O 組成が高いほど水分との反応性、すなわち潮解性は大きくなるので、Al の濃度を出来るだけ高くする必要がある。一方、この合金が Al の融点 660℃以下になると、固体の Al が析出する。したがって、このような温度にならぬようにする必要がある。Al が析出しない濃度は非常に小さく、この場合、生成する酸化物は Na_2O となるので、遮断効果は期待できない。

② 液体金属自身の活量を下げ空気あるいは空気中の水分との反応速度を小さくする方法

液体 Na 系合金の熱力学から、Na と共晶合金を造る金属元素では Na の活量を下げる事が期待される。例えば Na-K 系がそうである。Na の活量が低いと、 $2\text{Na} + 1/2 \cdot \text{O}_2 = \text{Na}_2\text{O}$ の反応のギブスエネルギー変化、すなわち反応の駆動力を小さく出来るので Na の酸化を抑制する事ができる。

③ 液体金属自身が酸化し難い元素

鉛は水と Na のようには激しく反応しない。融点も 327℃で、系外に漏れた場合でも速やかに凝固するので、空気や水分との反応は抑制される。このような金属は他に Sn（融点 232℃）があり、はんだとして使われている Sn-Pb 系（共晶温度 183℃）がある。

(2) 液体金属が反応容器と反応し溶解・浸食する反応を抑制する場合

① 反応容器の表面にコーティングを施し液体金属との接触を遮断する方法

液体金属に使われる保持材料はステンレスが多い。液体鉛を冷却媒体に使用する場合、オーステナイト系ステンレスは鉛と反応し、溶損することが知られている。一方、フェライト系オーステナイトを用い、鉛中の酸素ポテンシャルを調整して、オーステナイト表面にマグネタイトの酸化層を形成させると鉛との反応を遮断することができる。

② 液体金属中の不純物を反応容器材質と熱力学的に平衡させる方法

液体金属冷却媒体への溶解度が非常に小さい物質を容器材料に用いる事が考えられる。この場合、容器材料物質は液体金属の中で活量係数は非常に大きくなるので、わずかに溶けるだけで容器材料と熱力学的平衡に達する。鉛中への Fe や Cr の溶解度は非常に小さいが、Ni は 800℃で 2 mass% 程度の溶解度がある。この場合、Ni が鉛中へ溶解して、温度の低い場所に析出する可能性がある。液体 Na に対しては Fe、Cr、Ni 共に溶解度は非常に小さい。

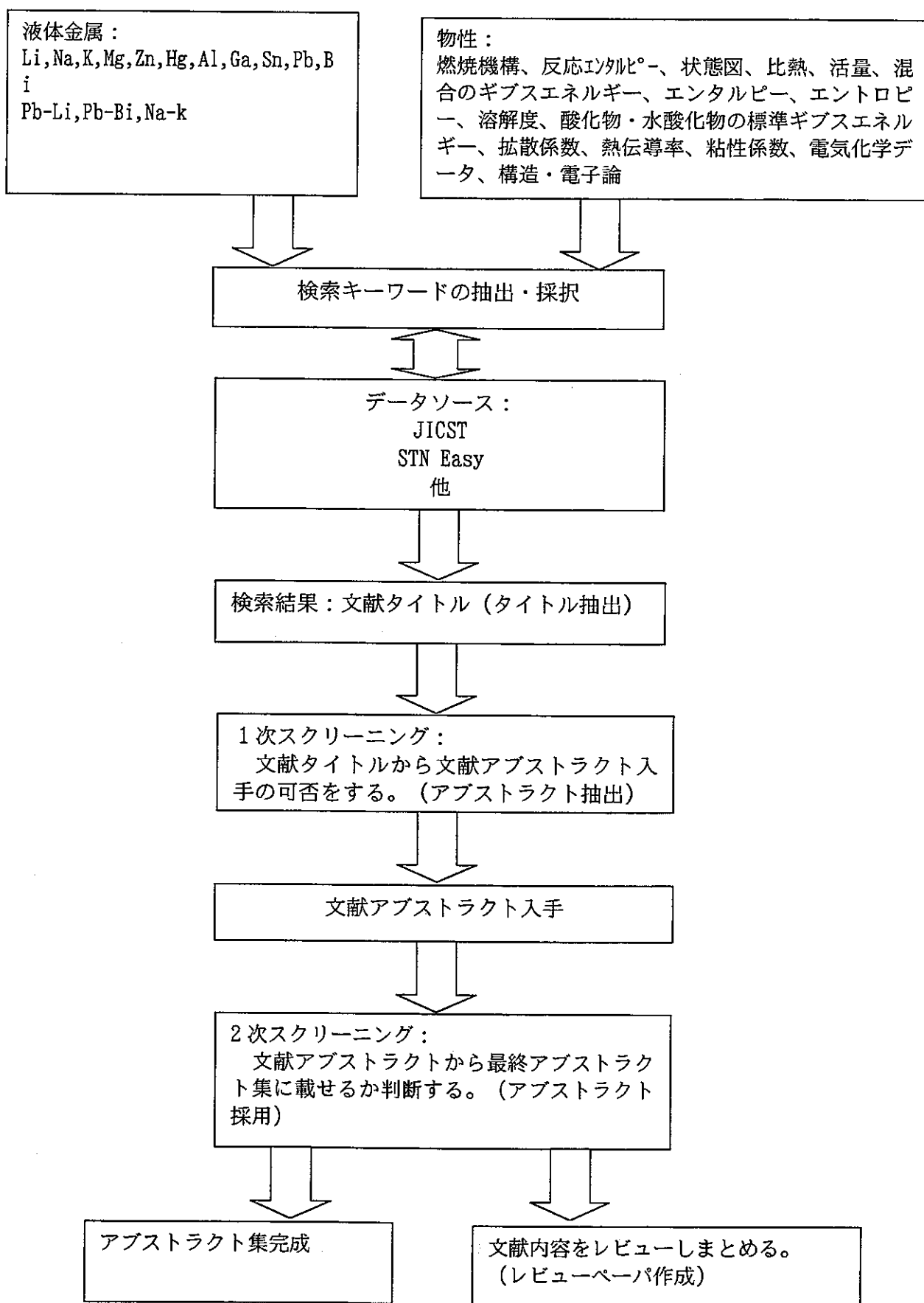


図 3.1 化学的データ収集方法

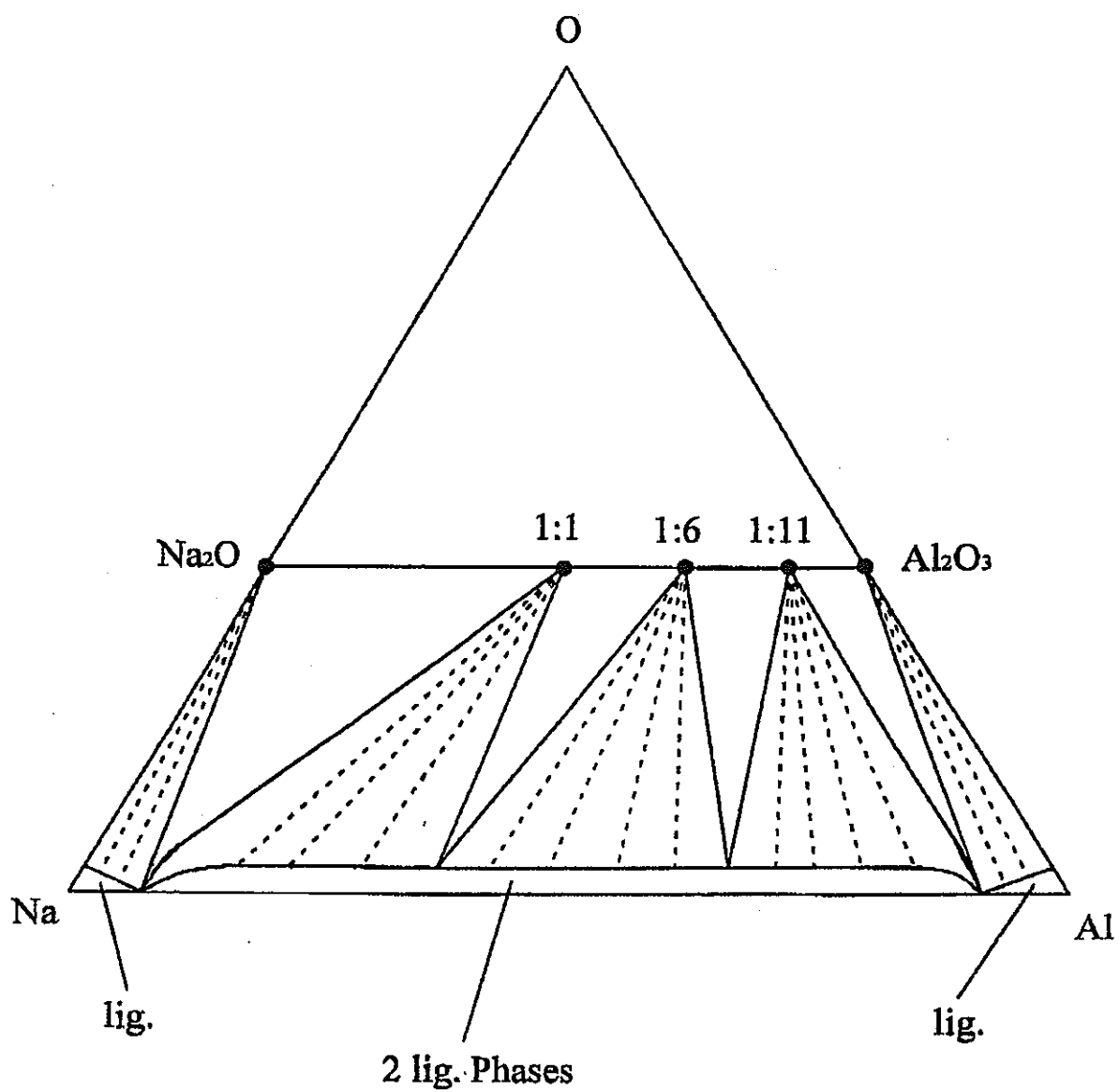


図3. 2 Na-Al-Oの3成分系状態図

表3.1 液体金属の化学的挙動文献データ検索結果

	検索データベース	検索式<キーワード>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	合計	作業進捗状況、検索条件
			Li	Na	K	Mg	Zn	Hg	Al	Ga	Sn	Pb	Bi	Pb-Li	Pb-Bi	NaK		
1 燃焼機構	・The combustion Institute Home page(備考参照) ・JSTのNuclenデータベース		13	31	2	15	0	1	28	0	0	1	0				91	2次スクリーニング終了。 http://ivory.lm.com/~combust/
2 反応エンタルピー	・JICST*2 ・JICST7580*3	1式:(<金属>+<金属>化合物+<金属>酸化物+<金属>水酸化物)*(<エンタルピー>+標準エンタルピー) 2式:(<element>+<element>[W]compound+<element>[W]oxide+<element>[W]hydroxide)*(<Enthalpy>)	(1,546/)	(3,347/)	(1,976/)	(1,373/)	(1,245/)	(621/)	(2,663/)	(668/)	(678/)	(764/)	(348/)	*1	*1	*1	(15,229/)	タイトル抽出完了。 2式を採択。
3 状態図	・JICST*2 ・JICST7580*3	1式:(<金属>+<金属>化合物)*(<状態図>+相平衡状態図) 2式:(<金属>+<金属>化合物)*(<2元系状態図>+3元系状態図+相平衡状態図) 3式:(<element>+<element>[W]compound)*(<Phase[W]Diagram>)	(1,340/)	(2,535/)	(1,708/)	(1,482/)	(992/)	(483/)	(2,874/)	(1,218/)	(709/)	(1,356/)	(1,046/)	*1	*1	*1	(15,743/)	抽出された文献タイトルの1次スクリーニング終了。 元素毎の分類は未完。 2式、3式の検索キーワードを採択。
4 比熱	STN Easy	*4	(12/)	(15/)	(2/)	(1/)	(1/)	(2/)	(4/)	(5/)	(3/)	(9/)	(0/0)	(3/)	(1/)	(2/)	(60/)	タイトル抽出完了。
5 活量	STN Easy	*4	(26/)	(51/)	(12/)	(8/)	(10/)	(2/)	(17/)	(9/)	(23/)	(30/)	(9/)	(13/)	(5/)	(5/)	(230/)	タイトル抽出完了。
6 混合ギブズエネルギー	STN Easy	*4	(1/)	(1/)	(0/0)	(0/0)	(0/0)	(0/0)	(0/0)	(0/0)	(2/)	(0/)	(2/)	(0/0)	(0/0)	(3/)	(9/)	タイトル抽出完了。
7 混合エンタルピー	STN Easy	*4	(4/)	(10/)	(1/)	(7/)	(2/)	(1/)	(7/)	(7/)	(7/)	(7/)	(3/)	(3/)	(1/)	(1/)	(65/)	タイトル抽出完了。
8 混合エントロピー	STN Easy	*4	(6/)	(14/)	(3/)	(3/)	(1/)	(2/)	(3/)	(4/)	(7/)	(7/)	(3/)	(3/)	(0/0)	(3/)	(59/)	タイトル抽出完了。
9 溶解度	・JICST*2 ・JICST7580*3	1式:(液体<金属>+<金属>)*溶解度*不純物 2式:(液体<金属>+<金属>)*(<鉄+ニッケル+アルミニウム+クロム+マンガン+モリブデン+酸素+水素+炭素+窒素+カルシウム+珪素>)*溶解度 3式:(Liquid[W]<element>+<element>)*Solubility*(Element+Impurity) 4式:(Liquid[W]<element>+<element>)*Solubility*(Iron+Nickel+Aluminum+Chromium+Manganese+Molybdenum+Oxygen+Hydrogen+Carbon+Nitrogen+Calcium+Silicon)	(17/)	(26/)	(7/)	(18/)	(26/)	(6/)	(44/)	(14/)	(18/)	(35/)	(24/)	*1	*1	*1	(235/)	抽出した文献タイトルから1次スクリーニング終了。 2式、4式を採択。
10 酸化物や水酸化物の標準生成ギブズエネルギー	JICST	1式:M*OXIDE*GIBBS*ENERGY (Mは備考参照) 2式:M*HIDROXIDE*GIBBS*ENERGY	4(47/7)	10(110/18)	10(55/12)	4(48/4)	7(39/10)	2(14/4)	4(119/9)	6(23/7)	4(37/9)	12(79/20)	7(31/7)	*1	*1	*1	70(602/107)	2次スクリーニング終了 M: LITHIUM,SODIUM,POTASSIUM,MAGNESIUM,ZINC,MERCURY,ALUMINUM,GALLIUM,TIN,LEAD,BISMUTH.(但し、1式検索のみ、MgはMGで検索し、MAGNESIUMで検索しない。
11 拡散係数	STN Easy	*4	(6/)	(5/)	(2/)	(0/0)	(0/0)	(2/)	(0/0)	(2/)	(5/)	(5/)	(2/)	(3/)	(0/0)	(2/)	(34/)	タイトル抽出完了。
12 熱伝導度	STN Easy	*4	(14/)	(14/)	(6/)	(1/)	(2/)	(11/)	(4/)	(12/)	(3/)	(9/)	(6/)	(0/0)	(6/)	(3/)	(91/)	タイトル抽出完了。
13 熱拡散率	STN Easy	*4	(1/)	(2/)	(2/)	(0/0)	(0/0)	(4/)	(0/0)	(1/)	(1/)	(2/)	(1/)	(0/0)	(0/)	(1/)	(15/)	タイトル抽出完了。
14 粘性係数	STN Easy	*4	(18/)	(24/)	(13/)	(1/)	(4/)	(10/)	(10/)	(5/)	(7/)	(15/)	(14/)	(0/0)	(1/)	(4/)	(126/)	タイトル抽出完了。
15 電気化学的データ(電極電位、腐食電位、電極反応速度等)	JICST	1式:M*ELECTROCHEMICAL(W)DATA 2式:M*CORROSION(W)POTENTIAL	0(1/0)	0(3/0)	0(1/0)	0(0/0)	0(2/0)	1(5/1)	0(2/0)	0(0/0)	0(2/0)	0(1/0)	0(0/0)	*1	*1	*1	1(17/1)	2次スクリーニング終了。 M: LITHIUM,SODIUM,POTASSIUM,MAGNESIUM,ZINC,MERCURY,ALUMINUM,GALLIUM,TIN,LEAD,BISMUTH.
(腐食、質量移行*3)		LIQUID*M*CORROSION/MASS(W)TRANSFER	(206/132)	(638/287)	(145/21)	(85/17)	(163/33)	(46/16)	(283/51)	(34/10)	(55/8)	(181/70)	(39/19)	*1	*1	*1	(1874/664)	
16 液体金属の構造・電子論	JICST	式1:"liquid metal"OR"液体金属"AND"構造"OR"structure"AND"電子論" 式2:"liquid metal"OR"液体金属"AND"電子論"															3	2次スクリーニング終了。
アブストラクト採用合計			27	69	17	22	15	6	37	9	8	17	11				12	2次スクリーニング終了。

検索結果(件数)の記載方法:

**(#/#/+):

**:#アブストラクト採用計(2次スクリーニング結果)

#:#タイトル抽出計

**:#アブストラクト抽出計(1次スクリーニング結果)

記載無き(空白部)は作業未完。

*1:それぞれの元素に含まれるものとして検索を省略。

*2:1981.01-1999.07:10,519,579件、1999.07.03更新

*3:1975.01-1980.12:2,196,411件、1999.06.19更新

*4:

純金属の検索キーワード: metal+liquid+element+property

合金の検索キーワード: alloy+liquid+element(1)+element(2)+property

element: Li,Na,K,Al,Bi,Ga,Pb,Hg,Mg,Sn,Zn,Na-K,Pb-Bi,Li-Pb

property: viscosity,thermal conductivity,thermal diffusivity,specific

heat,diffusivity,activity,mixing Gibbs energy,mixing enthalpy,mixing entropy

第4章 まとめ

4.1 利用技術の調査

液体金属の取り扱い技術の調査では、まず、高速炉における鉛および鉛・ビスマス冷却材の研究動向について文献ならびにロシアでの実地調査をおこなった。その結果、鉛や鉛・ビスマス等の重金属を高速炉の冷却材として用いる場合、メリットとしては、化学的活性が小さく固有安全性（高沸点による裕度確保、高密度による再臨界排除等）の成立などがあり、高速炉の問題点をかなり解決できる可能性のあることがわかった。一方、デメリットとしては低い熱伝導度、材料の腐食、鉛・ビスマスの場合放射性ポロニウム生成、耐震性や凍結防止などの運転上の課題が挙げられる。

鉛、鉛・ビスマスなどの重液体金属取扱いに関する基盤的な技術や原理についての追求はロシアでは確かに先行している。しかし、地上炉においては先行小型ループ運転経験に基づき解決された腐食も含め問題がまだ多数輩出する可能性が残されており、実機規模へそのまま従来技術が適用できるか否か慎重に検討を要することが指摘される。また、ロシアでは、必ずしもすべての機関が一致して鉛、鉛・ビスマス冷却高速炉の開発を推進すべきと主張しているわけではなく、従来のナトリウム冷却高速炉開発の実績に基づく安全性、経済性に対する優位性を積極的に主張している機関もあり、様々に技術的選択要素のある高速炉開発の取組み方としては、ロシア国内の経済的な困難さを別にすれば、ある意味では健全な形でもある。

国内における重液体金属の取扱い技術の調査では、鉛および亜鉛の精錬工程に液体金属を利用している八戸精錬を実地調査した。その結果、鉛および亜鉛の液体金属は化学的にも活性が低いという点から、技術的には大きな困難もなく安全に取り扱っている様子であった。安全性に対する配慮としては、鉛や亜鉛の毒性に対する予防、水が高温の液体と接触する際の蒸気爆発の可能性や作業員の火傷などが留意事項であって、高速炉冷却材で見られる配管材料との腐食を防ぐための高度な技術的取組みの必要性は大きな問題としていないようである。金属の精錬・製造事業と原子力分野で要求される安全性に対するレベルの違いがこのような技術的取組みの差に表れて

てきたのか、ともかくわが国における重液体金属の基礎化学的な研究例があまり多くない現状を見ると、高速炉開発なども含め高度な安全性が要求される分野においては今後もロシアを中心として関係各所からの情報入手をしながら、検討評価していく必要がある。

英国における使用済みナトリウム処理・処分技術の調査結果によると、現状ではフランスで行われている技術を導入してナトリウムの処理・処分を行おうとしているようである。しかし、ナトリウムの処分は予定から大幅に遅れている様子であり、今後これらの処理方法について継続的にフォローし、わが国において今後発生するであろう高速炉のナトリウム処理・処分の参考にすることが必要と思われる。

4.2 液体金属の取扱いについて

液体金属の安全性に関する文献情報の調査では、ナトリウムの安全性、ならびにそれ以外の液体金属 9 種類について性状、危険性や取扱いの注意事項などをまとめた。ナトリウムについては比較的詳細な情報を入手したが、リチウムほかの液体金属については今後とも文献調査を継続して更に詳細情報を取りまとめていく必要がある。

事故トラブルの事例については、おもに国内外のナトリウム取扱い施設の事例を調査した。ナトリウム取扱い施設における事例では、国や機関が異なっても事故の内容、原因はほとんど同じとって良いことがわかった。すなわち、バルブやベローズなどの配管部品の破損、ヒーターの絶縁劣化、熱膨張の考慮不備、溶接部の欠陥、洗浄液による腐食など、使用する液体金属の熱・機械的及び化学的性質に対する配慮の不足、取扱いに対する基本的事項の遵守の不備などである。

一般化学工業における安全対策の調査では、九州にある三菱化学黒崎事業所、日鉱金属佐賀関精錬所および旭化成薬品工場及び東海工場を実地調査した。調査対象の事業所はそれぞれ伝統ある化学工場であり、安全対策についてはいずれも全社をあげて取り組んでおり、また十分な経験を有していることが窺われた。

これらの事業所では、安全を確保するための施策として、TPM (Total Productive Management) 活動、YKZ (薬品工場故障ゼロ運動)、

KY（危険余地運動）、HHK（ひやりはっと気がかり）など全員が何らかの形で参加する小集団活動が行われており、更に、これらに取組むことを可能とする組織・体制を管理者が整備し、安全マニュアルの徹底や実地教育、設備運転員の訓練ならびにそれらに対する投資などが共通に見られた。このような全員が何らかの形で参加する安全対策活動を通じて安全を確保するという施策は、原子力を含む液体金属の取り扱い事業所でも共通する取組み施策であると思われた。

4.3 化学挙動評価研究

液体金属の物性値や化学的特性などに関するデータを文献検索により調査した。対象物質はLi, Na, K, Na-K, Mg, Zn, Hg, Al, Ga, Sn, Pb, Pb-Li, Pb-Bi, Biの14物質である。物性値としては①燃焼機構、②反応エンタルピー、比熱、③状態図、④活量、⑤混合のギブスエネルギー、エンタルピー、エントロピー、⑥溶解度、⑦酸化物や水酸化物の標準生成ギブスエネルギー、⑧拡散係数、熱伝導度、熱拡散率、⑨粘性係数、⑩電気化学的データ（電極電位、腐食電位、電極反応速度等）、⑪液体金属の構造・電子論の11種類である。

文献検索の結果をまとめると、抽出された論文のタイトルからは、⑤混合ギブスエネルギー、⑧熱拡散率、⑪電子構造論に関する文献が少なく、これらに関する研究があまり行われていない傾向が認められた。また、すでにアブストラクトの選定作業が終了している①の液体金属の燃焼に関わる事項では、アルミニウムとマグネシウムはロケット推進用燃料として、またリチウム、カリウム、ナトリウムのアルカリ金属は核融合炉ブランケット関連および高速炉の冷却材として使用されることから冷却材の漏洩時の燃焼挙動に関する研究が行われていることがわかった。今後、液体金属の化学的挙動に関する総合的アブストラクト集の作成を行うために、本年度作業で抽出した文献に関し、さらに内容を検討して候補文献を抽出選定する必要がある。

4.4 活性抑制金属の可能性について

活性抑制金属の可能性についての文献調査では、直接的にその点に触れて研究を行ったものは見当たらなかった。しかし、①液体金

属が空気あるいは空気中の水分と反応をすることを抑制する場合、および②反応容器と反応し、溶解・浸食する場合について熱力学的な検討を加え、①については、Na-Al 合金、Na-K および Sn-Pb などについて考察、また②についてはステンレス鋼およびその構成元素の系について考察した。

以上、平成 11 年度は液体金属の基礎化学調査研究の第 2 年目として、文献調査および実地調査研究活動を行い、液体金属の利用技術ならびに化学的挙動評価に関するさまざまな情報を収集した。今後はこれら情報の収集を継続するとともに、これまでに収集した情報を系統的に整理し、とりまとめる必要がある。また、液体金属の化学的データに関する研究の総合的なアブストラクト集を完成させることが必要である。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、液体金属基礎化学調査研究委員会の藤井靖彦委員長、荒川鐵太郎副委員長はじめ各委員の方々には、多忙な日程を割いて本委員会にご出席をいただき、文献調査ならびに実地調査活動では情報収集ならびに貴重なご報告をいただいたことを感謝致します。また、国内実地調査では本調査委員会の事業所視察などを快く受け入れてくださいました三菱化学株式会社、日鉱金属株式会社、旭化成株式会社および八戸製錬株式会社に感謝致します。

なお、本稿は上記のように多くの委員の方々のご報告をもとにとりまとめたものですが、その中でも特に第2章利用技術調査研究の2.1.1節「鉛および鉛-ビスマス冷却型高速炉に関する研究開発の動向」はサイクル機構山田文昭氏の報告、2.1.2節「ロシアにおける鉛、鉛・ビスマスの利用技術の現状」は青砥紀身委員の報告、2.2.1節「液体金属の安全性に関する情報入手」は松村幸彦委員の報告、2.2.3節「事故トラブル事例」は下屋敷重広委員の報告および2.3.1節「化学工業における安全対策」の一部分は荒川副委員長と宮原信哉委員の報告原稿、ならびに第3章3.2.1節「活性抑制金属の可能性検討」は永田和宏委員の報告をもとに取りまとめさせていただきました。ここに記して感謝の意を表します。また、核燃料サイクル開発機構山田文昭氏および榊原安英氏には、本調査研究を実施するにあたり終始大変お世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。