軽水炉 1 次冷却系における放射性腐食生成物 挙動に関する研究状況と今後の課題

(東京大学) 石 樽 頭 吉,

(三菱原子力工業(株)) 大 沢 安 隆, (日立製作所) 内 田 俊 介

軽水炉 1 次冷却水中の放射性腐食生成物低減対策として、これまで腐食生成物の発生抑制と除去に重点を置いて、その実用化が進められてきた。しかし、腐食生成物の発生、放射化、蓄積など主要ステップの詳細な機構は、学問的には未解決な点が多く、これら諸現象および機構解明によって、より高度な工学的低減策の可能性があると考える。本稿では、上記主要現象のうち学問的に未解決なものを摘出し、その研究現状をレビューするとともに、今後の主要研究課題をまとめた。

I. はじめに

原子力プラントにおいては、プラントの安全性、信頼性および稼働率向上に関連して放射能低減対策の推進が重要な役割をもつ。特に、軽水炉においてはこれまでのプラント運転経験に基づいて、

- (1) 1 次冷却系の線量率がプラント停止時の保守点検作業中に従業員被曝の原因となる。
- (2) 1 次冷却系の線量率は機器、配管内面への ^{60}Co を中心とする放射性腐食生成物の蓄積による。

ことが明らかにされている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。すでに、放射性腐食生成物の低減対策として、腐食生成物の発生抑制と除去に重点を置いた対策が提案され、プラントでの実証試験⁽⁴⁾や実用化⁽⁵⁾がなされており、工学的には問題解決が進んでいる⁽⁶⁾。

しかし、腐食生成物の発生、放射化、蓄積などの主要機構についての解明は十分ではなく、学問的には未解決な点が多く、これら諸現象の解明によって、より高度な工学的低減策の可能性のあるものと考えられる。

本学会においても、この数年間で原子炉冷却水に係わる水化学の分野で研究発表が増加傾向にあり、1982 年 10 月には「水化学」研究専門委員会が発足し、上記問題を含む冷却水と構造材の相互作用について、広く関連分野の専門家による討議の場が持たれるようになった。今後の水化学における諸現象の討論をより効果的に行うためには、現状で何がわかっており、どこが不明確かを少しでも明らかにすることが重要と考えられる。本稿においては、現在の軽水炉の主流である加圧水型原子炉(PWR)と沸騰水型原子炉(BWR)について、プラントシステム側から水化学をみることに

て、1 次冷却系の主要部で問題となると考えられる諸現象を摘出し、現状で各現象がどの程度解明されているかをレビューするとともに、今後の主要研究課題をまとめてみる。

II. PWR における腐食生成物の挙動

1. PWR 1 次冷却系と水質管理の概要

PWR プラントは 1 次冷却系と 2 次冷却系が蒸気発生器を介して完全に隔離されているため、両系統の水質はそれぞれ独立に管理されており、その長所を活用した管理技術が確立されてきている。1 次冷却材は炉心で加熱され、次に蒸気発生器に入り、2 次系に熱伝達を行い蒸気を発生させる。蒸気発生器を出た 1 次冷却材は、1 次冷却材ポンプにより再び炉心に送られる。1 次冷却系の水質管理には次のようないくつかの特徴がある⁽⁶⁾。

- (1) 核反応度の化学制御材としてホウ酸を使用する。
- (2) 水の放射線分解による酸素の発生を抑制するために水素を添加する。
- (3) 腐食および腐食生成物放出量を抑制するために水酸化リチウムを添加する。
- (4) 炉停止操作時の付着放射性腐食生成物の溶出時期を pH や過酸化水素によって管理して、放射性腐食生成物を有効に除去する。

Present Status and Future Scope of Investigations on Behavior of Radioactive Corrosion Products in Primary Cooling Systems of Light Water Reactors: Kenkichi ISHIGURO, Yasutaka OHSAWA, Shunsuke UCHIDA.

(1983 年 2 月 10 日 受 理)

第1図にPWR 1次冷却系における腐食生成物挙動の概念図を示す。腐食生成物の発生, 移行, 燃料棒表面への付着・放射化・再放出, 移行, 炉心外機器表面への放射能蓄積のサイクル挙動はきわめて複雑であるが, 大別すれば, 図に示すように, 発生, 除去, 移行, 放射化, 蓄積の過程に分けることができる。

2. 1次冷却系の腐食生成物挙動に関する研究状況

第1表に, 1次冷却系の腐食生成物の挙動に関連する諸現象, 関連機器, 主要パラメータおよび機構をまとめて示し, 以下に各過程に関する研究状況について述べる。

第1図 PWR 1次冷却系における腐食生成物の挙動

第1表 PWR および BWR 1次冷却系における腐食生成物の挙動に係わる諸現象

ステップ	現象	概要	関連箇所		主要パラメータ	既提示機構, モデル
			PWR	BWR		
発生	コロージョン	構造材からの金属の溶出, 脱離	蒸気発生器	復水器, 給水ヒータ	温度, pH, O ₂ 濃度, H ₂ 濃度, 材料表面	電気化学的機構
	エロージョン	同上	同上	タービン	温度, pH, O ₂ 濃度, H ₂ 濃度, 材料表面, 流速	キャビテーション, エロージョン
除去	イオン交換	イオン交換樹脂による金属イオン除去	浄化系	復水浄化系	流速	電離平衡モデル
	吸着	イオン交換樹脂による粒子(クラッド)除去	—	同上	流速, 粒径, pH	物理あるいは化学吸着
	ろ過	フィルタによるろ過	—	同上	流速, 粒径, pH	幾何学的分離
	磁化	電磁フィルタによるマグネタイト除去	浄化系	同上	流速, 磁束密度	磁気吸着
移行	形態変化	イオンの結晶化	原子炉, 配管	—	温度, pH	濃度差による析出モデル
		水酸化物から酸化物への変化	—	原子炉	温度, O ₂ 濃度	熱力学的平衡モデル
	形状変化	粒径増大	原子炉, 配管	同上	温度, O ₂ 濃度, pH	同上
	Co吸着	粒子へのCoイオンの吸着	—	同上	温度, O ₂ 濃度, pH	同上
放射化	燃料棒への付着(粒子)	壁面衝突による付着	原子炉	—	温度, 流速, pH, 粒径	衝突確率モデル
		伝熱沸騰面への析出	—	原子炉	温度, 流速, 熱流束, 粒径	薄膜蒸発乾固
	燃料棒への付着(イオン)	付着粒子への吸着	原子炉	同上	温度, pH	熱力学的平衡モデル
	燃料棒からの脱離(粒子)	粒子の流体による剝離	同上	同上	温度, 流速, pH	機械的剝離
	燃料棒からの脱離(イオン)	付着粒子の溶解	同上	—	温度, pH	濃度差による溶解モデル
		付着粒子からイオンの溶出	—	原子炉	温度, pH	熱力学的平衡モデル
	中性子照射	中性子吸収による核変換	原子炉	同上	中性子束, 滞在時間	核変換
蓄積	付着(粒子)	伝熱管への粒子の析出	蒸気発生器	—	温度, pH, H ₂ 濃度, 流速	濃度差による析出モデル
		配管内面への粒子の付着	—	再循環ポンプ, 配管	温度, 流速, 粒径	衝突確率モデル
	付着(イオン)	伝熱管, 配管内面へのイオンの付着	蒸気発生器	同上	温度, pH, O ₂ 濃度, H ₂ 濃度	酸化被膜成長モデル
	脱離(粒子)	伝熱管, 配管内面からの粒子脱離, 機械除染	同上	同上	温度, 流速, O ₂ 濃度	機械的剝離
	脱離(イオン)	伝熱管, 配管内面からのイオン脱離, 化学除染	同上	同上	温度, pH	熱力学的平衡モデル

(1) 発生

PWR プラントにおける腐食生成物の主要な発生源は、1次冷却材接液表面積の大きい蒸気発生器伝熱管材のインコネル600である。インコネル600の高温水腐食に関する研究は多いが、これらを総合すると定常状態での腐食速度および腐食生成物からの金属放出速度は、それぞれ1.5~4.5、0.5~2.0 mdm(mg/dm²/mo)と評価されている⁽⁷⁾。しかし、腐食生成物の挙動の解明には、各元素の腐食挙動を明らかにする必要がある、材料の主要構成金属元素だけでなく、微量不純物であるCoの溶解挙動に関する研究が進められている⁽⁸⁾。

(2) 除去

PWR プラントでの放射性腐食生成物の除去は、第1図に示したように混床式脱塩塔により行われる。特に炉停止時には、酸化運転と呼ばれる方法が採用される。この方法は、炉停止降温操作時のホウ酸添加とホウ酸解離度の増加による冷却材pHの低下およびこのpH領域において負の温度係数をもつ腐食生成物の溶解度特性と、低温停止後に炉心内で発生する過酸化水素等の酸化剤のCo, Ni溶解促進作用を適切に活用することにより放射性腐食生成物を有効に溶出させ、浄化系のフィルタとイオン交換樹脂で除去するものである⁽⁹⁾。現在も引き続き、この方法の最適化に関する研究が進められている。

最近、PWR プラントのクラッドの主要物質がニッケルフェライト等の強磁性体である⁽¹⁰⁾ことから、高温フィルタとしての電磁フィルタの適用に関する研究が各国で行われている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

(3) 移行

腐食生成物は冷却材中を粒子状およびイオン状で移行する。粒子状およびイオン状腐食生成物の濃度は、それぞれ10~20および2~10 ppb(10⁻⁹ g/g H₂O)と評価されている⁽¹³⁾が、最近、高温フィルタによる腐食生成物の除去性能の評価にも高温状態での濃度を明らかにする必要があり、高温サンプリングによる再評価研究が進められている⁽¹⁴⁾。

(4) 放射化

冷却材中の腐食生成物は炉心の燃料棒に付着して放射化されるが、PWR では水質管理法の改善によって放射性腐食生成物の発生量を抑制する研究が行われている。その基本は、ニッケルフェライト等の腐食生成物からのFeやNiの溶解度の温度依存性がpHによって異なる現象を利用するものである。溶解度が正の温度係数を示すような高pH領域で運転すれば、高温部である燃料棒表面への腐食生成物の付着を抑制する

ことができ⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾、その最適pHは1次冷却材の水質基準値内にあることが示されている⁽¹⁷⁾。付着に及ぼす溶存水素、クラッド濃度、熱流束や照射の影響も重要であるが、pHほどその影響は大ではないといわれている⁽¹⁸⁾。

(5) 蓄積

PWR プラントの放射性腐食生成物の主要核種は⁵⁸Coと⁶⁰Coであるが、これらの炉心外の機器・配管表面への蓄積挙動に関する研究によれば、その付着速度はpHと材質によって大きな影響を受ける⁽¹⁹⁾とともに材料の腐食皮膜の成長速度に依存する⁽²⁰⁾。

放射化の項で述べた高pH水質管理法では、1次系内の放射性腐食生成物の発生量を低減化することにより、炉心外の蒸気発生器等の機器表面の放射線量を軽減することができると考えている。

III. BWR における腐食生成物の挙動

1. BWR 1次冷却系の概要

BWR 1次冷却系の特徴は、直接サイクルの採用によりタービン系を含む点にある。タービンに直接蒸気を供給するため、冷却水は炉心部で蒸気泡を発生し、二相流で冷却される⁽²¹⁾。我が国で稼働中の新型転換炉(ATR)はBWR同様、直接サイクルを採用しており、1次冷却系での腐食生成物挙動の観点からはBWRと同等に評価できる。

第2図に1次冷却系の概要と腐食生成物挙動を模式的に示す。実際には、図のように単純ではなく、発生から蓄積までのプロセスは複雑に関連し合っているが、基本的には図示した①~⑤の5つのステップに分類可能である⁽²²⁾。

第2図 BWR 1次冷却系における腐食生成物の挙動

なお、BWR 1次冷却水の水質管理の概要は既発表論文⁽²¹⁾⁽²³⁾に詳しいので本稿では詳細説明を省略する。

2. 1次冷却系における腐食生成物挙動に関する研究状況

第1表に、腐食生成物の挙動に係わる諸現象とその

概要, 主要パラメータならびにこれまでの現象説明に提示されている機構, モデルを PWR と比較して示した。以下, 各ステップについて研究状況を示す。

(1) 発生

コロージョン, エロージョン共に研究例は多く, 原子力以外の分野, 例えば火力関連の研究例も参考になるが⁽²³⁾, BWR の条件である中性純水中での腐食に関する研究, 特にステンレス鋼などの母材中の Co を中心とする微量成分の溶出速度に関する研究例は比較的少ない^{(24)~(27)}。

(2) 除去

復水脱塩器, 炉浄化系脱塩器は1次冷却水中の可溶性および不溶性腐食生成物を除去し, 冷却水の浄化に寄与する。可溶性のイオンについてはイオン交換樹脂によって捕集される。一方, 不溶性のクラッドについてはイオン交換樹脂での捕捉機構は明確ではなく, Van der Waals 力あるいは電気2重層の静電力による吸着など⁽²⁸⁾が提示されているが, その機構解明は今後の課題と考える。

新しい試みとして, 電磁フィルタあるいはマグネタイトフィルタ, 無機イオン交換体の開発が進められているが, 前者は特にマグネタイト粒子の磁性を用いたもので, 他の分野でも広く研究が行われている。後者はCoなど遷移金属イオンを選択的に除去するもので, マグネタイトフィルタでは再循環系配管へのCoイオン蓄積と同様に, Fe, ステンレス鋼などの表面にスピネル層を形成する際, 金属イオンを格子に取り込む性質を用いたものである⁽²⁹⁾。また無機イオン交換体は, チタン酸化物などにより, 高温でマグネタイトフィルタ以上に効率的にCoを選択吸着するもので, 現在実証テストが行われている⁽³⁰⁾。

(3) 移行

BWR の炉水では腐食生成物は90%以上がヘマタイトである⁽²⁸⁾。炉水中でのその粒径は約6 μm との報告もある⁽³¹⁾。構造物から溶出し, これら不溶性粒子に至る間には様々なプロセスをたどり, 粒径, 形態が変化するが, その詳細についてはまだ十分には明らかにされていない。最近, 特に放射線がクラッドの成長に及ぼす影響についての研究も行われている⁽³²⁾。

Coは発生時は大部分イオンとして冷却水中に溶解するが, 一部が主として燃料棒表面で付着したヘマタイト粒子(クラッド)表面に吸着され, クラッドコバルトとなる。

(4) 放射化

腐食生成物は燃料棒に付着して放射化される。照射

による核変換は炉物理その他の分野で膨大な研究がなされているが, 燃料棒への腐食生成物の付着および脱離についての研究は比較的新しい。付着に関しては, 熱流束依存性などの研究をもとに沸騰に起因する粒子の付着モデルの提案がなされている^{(33) (34)}。しかしイオンの付着については, まだ十分な解明はなされていない。

一方, 脱離については, 粒子に関して流体による剪断力で機械的に付着物を剥ぎとるモデルが提示されている⁽³⁵⁾。イオンの脱離については, 特に燃料表面が高照射下である点から照射の影響を強く受けると推定されるが, 現状ではほとんどデータが得られていない。

(5) 蓄積

放射性腐食生成物の機器, 配管内面への蓄積および脱離については広く研究されている。蓄積についてはカナダでの研究がよく知られている^{(20) (36) (37)}。また, 酸化皮膜の生成と⁶⁰Coの蓄積についての相関が求められている⁽³⁸⁾。

脱離については, 特に除染に関連した研究が最近盛んになりつつあり, 論文も増加の傾向にある⁽³⁹⁾。

3. 腐食生成物の分析に関する基礎的な研究状況

腐食生成物挙動について研究するためには, 実験室における模擬実験であれ, 実機発電所における測定であれ, 腐食生成物の採取, 分析ならびに腐食環境, 例えば溶存酸素濃度, pH, 電導度などの分析が重要である。

(1) 腐食生成物の採取および分析

1次冷却水中の腐食生成物濃度はppbオーダーであり, その微量成分であるCoに至ってはppt (10^{-12} g/g- H_2O)オーダーである。このため濃度測定に当っては, 冷却水の採取, 腐食生成物の濃縮が必要となる。

1次冷却水の採取のためには, まず冷却水の降温, 減圧が必要であり, このための長いサンプリング管が設けられているが, 対象とする腐食生成物が極低濃度であるため, サンプリング配管の材質・流速などによっては測定の妨害となる元素の溶出等が考えられる。西欧ではアイソキネティックサンプリング法が提唱され, 火力および原子力プラントで採用されている⁽⁴⁰⁾。

クラッドは孔径0.45 μm メンブレンフィルタによって汙過濃縮されるのが一般的であるが, イオンはイオン交換樹脂カラムあるいはイオン交換ペーパーを用いて濃縮される。

濃縮された腐食生成物は, 溶解その他の前処理の後, 比色法で濃度測定が行われることが多いが, 最近では蛍光分析, プラズマ発光分析, 液体クロマトグラ

フなど種々の方法で元素分析が行われている。

(2) 腐食環境測定

腐食環境として、温度、pH、溶存酸素濃度、電導度が測定されるが、温度を除いては 1 次冷却水を降温、減圧してのち測定するのが普通である。低温での値と高温での値とが明確に対応づけられる限り、本測定法でも問題はないが、最近では一部に高温高圧下での pH あるいは溶存酸素濃度についての直接測定が見られ始めている⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾。

IV. 今後の研究課題

既述のように、1 次冷却系における放射性核種の蓄積機構は多くの現象に関連しており、きわめて複雑で、これまでに数多くの研究が行われているにもかかわらず、今後の研究にまつ面も多い。現在すでに進行中のものも含めて、今後の研究が必要と考えられる問題点を整理すると、以下に示すように 3 項目に分類することができるであろう。

1. 放射性腐食生成物の蓄積過程に

直接関連する問題

(1) 腐食生成物の放出

腐食表面からの腐食生成物の放出は、問題の発生源であり極めて重要な意味を持つことから、従来、数多くの研究がなされてきた。しかしながらその多くは、比較的短い時間内の腐食に関するものである。腐食生成物の放出挙動は、初期と例えば 10,000 時間というような長時間経過した後では相当様子が違っている⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾。実プラントで問題となるのは、相当長時間経過した時点での腐食であり、しかも複雑な環境の履歴を経ている場合が多い。このような状況での放出挙動を評価できるデータは現在のところ極めて乏しい。さらに、例えばステンレス鋼の腐食において、従来主成分である Fe の放出に関心が集中し、微量成分である Co の放出データは極めて少ない。Fe と合わせて Co の放出データは欠くべからざるものであり、緊急度の高い研究項目である。

(2) クラッド挙動の界面電気化学的側面

最近、粒径の小さなクラッド粒子の存在と挙動に関心が高まっている⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾。また比較的低温の低い部分では非晶性微粒子の存在の可能性も考えられている。水中における金属酸化物粒子は表面電荷を有しており⁽²⁸⁾、このような粒子の界面電気化学的相互作用は、フィルタ表面⁽⁴⁷⁾、イオン交換樹脂や配管表面への付着などクラッド挙動に影響を及ぼすと考えられる。特に粒径の小さな粒子においてこの効果が大きいことが予

想され、この面からのアプローチが不足している。

(3) 脱離過程

クラッド粒子の燃料棒表面・配管表面への付着や⁶⁰Co イオンの配管表面への付着に関するデータはある程度存在する。しかし一たん付着したクラッド粒子やイオンの脱離に関してはほとんどわかっていない。脱離過程は付着過程に劣らず重要である。例えば、燃料棒からクラッドやイオンの脱離がないならば、配管表面の放射性核種の蓄積は問題とはならないであろう。

(4) Alternative Water Chemistry の影響

BWR の応力腐食割れ(SCC)対策の 1 つの可能性として、給水系への水素ガス注入の試験が行われ、その結果に関心がもたれている⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾。これは、BWR の alternative water chemistry と呼ばれているが、将来恒常的に採用される可能性もある。BWR の水素ガス注入が放射性核種の蓄積にどのような影響を及ぼすかは、検討に値する興味深い問題である。

2. 関連する基礎的研究

(1) 高温水系の化学

高温水中のイオンや酸化物の挙動を理解する上で、熱力学データは貴重であり、その整備が行われている⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾。しかし熱力学は平衡に関する情報を与えるのみであり、反応速度に関する動力学データも必要である。また放射線存在下においては、熱力学的な平衡関係からシフトしたダイナミックな平衡状態となることが考えられ、この点でも熱力学データのみでは不十分である。

(2) 表面酸化皮膜の構造

高温水中の腐食表面やクラッドの付着した燃料棒表面はいずれも多層構造をとっていると考えられる。この多層構造は界面における物質移動とかかわりあっており⁽²⁰⁾⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾、その構造に関する知見は物質移動の全貌を知る上で重要である。しかし実験技術上の困難さもあって、データは乏しい。近年、表面分析技術の大きな展開が見られ、これに伴って新しいデータが報告され始めており⁽⁵²⁾、今後の発展が期待される。

(3) 金属酸化物の溶解

マグネタイトの高温における溶解度については数多くのデータがあるが⁽⁵³⁾⁽⁵⁴⁾、フェライトやヘマタイトに関してはほとんどない。PWR の pH コントロールに関する議論はマグネタイトの溶解度データに基づいて行われているが⁽⁵⁵⁾、ニッケルフェライト等を考慮すべきであるとの考えもあり、基礎データの充実が望まれる。

放射性核種の沈着した表面酸化層を薬剤によって溶

解除去する化学除染技術の開発が現在活発に進められている⁽⁸⁹⁾。除染剤は通常キレート剤、有機酸などを含む場合が多く、このような多元系での金属酸化物の溶解は母材の腐食とも関連して、極めて複雑な過程である⁽⁹⁰⁾。除染技術の一層の発展のためには、溶解過程の基本的な解明が重要である。

(4) コバルト化学

これは、前出の「高温水系の化学」に含まれる問題でもあるが、特に強調するためここに取り上げる。これまで放射性核種の蓄積機構やその対策はFeを中心に考えられてきた。その結果、最近のBWRなどでは1次系におけるFe量がきわめて低い値となっている。これに伴い、全体の機構を構築する上でCoの寄与が相対的に増大すると考えられ、吸着等も含めたCoの化学挙動に関連したデータの集積が必要となる。

3. 測定技術

(1) 高温における実験技術

1次冷却系における腐食生成物の挙動はその大部分が高温におけるものである。実プラントにおける冷却水のモニタリングやループ実験での測定はいずれも高温水を冷却して室温とした後に行われる。酸化皮膜やクラッド粒子に関連する観察や測定についても全く同様である。したがってわれわれは、室温のデータから高温の現象を「推定」しているに過ぎない。現在使用されている測定を高温高圧で行うには相当技術的困難が伴い、pHや溶存酸素濃度の測定さえ極めて困難である。しかし腐食電位のモニタリングなど高温高圧下の測定技術⁽⁹⁷⁾⁽⁹⁸⁾の開発が進められており、今後を期待したい。

(2) プラントデータの統一化

現象を正しく理解する上で、プラントデータを比較検討することは極めて重要である。以前は現場におけるデータの採取が各プラントの流儀で行われるケースが多かったが、このようなデータの重要性が認識され、サンプリング方法、分析手法、測定方法などある程度共通化される傾向にある。すでに米国の電力中央研究所(EPRI)はこの面で努力を払っており、最近では国際原子力機関(IAEA)にこの動きがある。

以上、1次系における腐食生成物に関する研究現状と今後の課題をまとめたが、著者らの主観に基づく部分もあることをご了承ください。

—参考文献—

(1) 長尾博之, 他: 原子力誌, 23[11], 796 (1981) などが代

表的。

- (2) WARMAN, E.A., et al.: EPRI NP-1862, (1981).
- (3) 電気新聞, 昭55.1.22.
- (4) SOLOMON, Y., et al.: WCAP-9407, (1978).
- (5) KOINE, Y., et al.: Int. Symp. on Water Chemistry and Corrosion Problems of Nuclear Reactor Systems and Components, Vienna, (1982).
- (6) MISHIMA, Y.: IAEA Specialists' Meeting on Influence of Power Reactor Water Chemistry on Fuel Cladding Reliability, San Miniato, Italy, Oct. (1981).
- (7) FLETCHER, W.D.: Proc. 31st Int. Water Conf., (1970).
- (8) KORMUTH, J.W.: Nucl. Technol., 37, 99 (1978).
- (9) 富沢 利, 他: 電中研報告, 280056, 昭56.7.
- (10) SANDLER, Y.L.: NACE Corrosion Meeting, Houston, Texas, Mar. (1978).
- (11) TROY, M., et al.: EPRI NP-514, (1978).
- (12) DARRAS, R., et al.: Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, BNES, London, (1978).
- (13) SHAW, R.A.: EPRI NP-692, (1978).
- (14) SOLOMON, Y.: 私 信.
- (15) SWEETON, F.H., et al.: ORNL-TM 2667, (1969).
- (16) SOLOMON, Y.: 私 信.
- (17) BESLU, P.: 文 献(6).
- (18) BURRILL, R.A., et al.: AECL 6952, (1980).
- (19) NELSON, N.R.: WCAP-3710, (1962).
- (20) LISTER, D.H.: Nucl. Sci. Eng., 59, 406 (1976).
- (21) 益田恭尚: 原子力工業, 17, 21 (1976).
- (22) UCHIDA, S., et al.: Nucl. Sci. Eng., 69, 78 (1979).
- (23) 鈴木勝美, 他: 機械誌, 82, 237 (1979).
- (24) BRUSH, E.G., et al.: Corrosion-NACE, 28, 129 (1972).
- (25) VREELAND, D.C., et al.: ibid., 17, 269 (1961).
- (26) FALK, I.: AE-517, AB Atomenergy (Sweden), (1977).
- (27) FALK, I.: Studsvik-78/1, AB Atomenergy (Sweden), (1978).
- (28) 石樽類吉: 原子力誌, 22[1], 9 (1980).
- (29) IVARS, R., et al.: Nucl. Sci. Int., 32 (1981).
- (30) KIKUCHI, M., et al.: Nucl. Eng. Design, 53, 387 (1979).
- (31) UCHIDA, S., et al.: ibid., 77, 496 (1981).
- (32) ISHIGURE, K., et al.: Nucl. Technol., 50, 169 (1980).
- (33) ASAKURA, Y., et al.: Nucl. Sci. Eng., 67, 1 (1978).
- (34) IWAHORI, T., et al.: Corrosion-NACE, 78, 39 (1978).
- (35) BLOCK, J., et al.: Trans. Am. Nucl. Soc., 16, 112 (1972).
- (36) LISTER, D.H.: Nucl. Sci. Eng., 58, 239 (1975).
- (37) LISTER, D.H.: ibid., 61, 107 (1976).
- (38) UCHIDA, S., et al.: Nucl. Technol., 59, 498 (1982).
- (39) REMARK, J.F.: Int. Conf. on Decontaminations of Nuclear Facilities, Niagara Falls, Canada, (1982).
- (40) HARDING, K., et al.: UKAEA, Lecture Notes, (1974).
- (41) NIEDRACH, L.W.: J. Electrochem. Soc., 127, 2122 (1980).
- (42) NAKAYAMA, N., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 19 [8], 678 (1982).
- (43) VIDEM, K., et al.: "Peaceful Uses of Atomic Energy", Vol. 10, p443 (1972), IAEA.
- (44) ISHIGURE, K., et al.: Radiat. Phys. Chem., 21, 281 (1983).

- (45) FERRETT, D.J., *et al.*: 文 献(6).
 (46) BART, G., *et al.*: *ibid.*
 (47) ISHIGURE, K., *et al.*: *Corrosion*/82, Paper 225, Houston, (1982).
 (48) FEJES, P.: *EPRI WS-79-174*, Vol. 4, (1980).
 (49) BURLEY, E.L., *et al.*: *Trans. Am. Nucl. Soc., TAN SAO* 43, 322 (1982).
 (50) RUMMERY, T.E., *et al.*: *AECL-4577*, (1973).
 (51) Von MASSOW, R.E., *et al.*: *AECL-4582*, (1975).
 (52) HÄNNINEN, H.E., *et al.*: 文 献(45).
 (53) SWEETON, F.H., *et al.*: *J. Chem. Thermodynamics*, 2, 479 (1970).
 (54) TREMAINE, P.R., *et al.*: *J. Solution Chem.*, 9, 415 (1980).
 (55) BESLU, P.: 文 献(6).
 (56) LISTER, D.H.: 文 献(56).
 (57) 藤井哲雄: 防食技術, 23, 257 (1974).
 (58) MacDONALD, D.D., *et al.*: *J. Electrochem. Soc.*, 128, 250 (1981).

☆ 核融合炉設計及び研究開発の現状と課題 ☆

「核融合炉物理・工学」・「核融合炉燃料・材料」両研究専門委員会 成果報告書

1983年4月1日 発行(限定出版) 好評発売中

◇B 5 判 タイポオフセット印刷, 約 750 ページ, 定価 10,000 円(会員特価 8,000 円)(〒400 円)

「核融合炉物理・工学」・「核融合炉燃料・材料」研究専門委員会が 1979 年 4 月に設置され, 4 年間にわたって調査研究活動が続けられてきた。前者においては, 近年著しい進展を遂げているトカマク炉の設計の整合性および問題点に視点を当て, 工学上の広い観点から検討され, またトカマク炉以外の炉型式についても議論され, 工学上の利害得失が明らかとなるように試みた。一方, 後者においては, 炉の燃料サイクル, 重要かつ緊急な課題であるブランケット構造材, 第 1 壁を初めとする特殊材料における研究成果の評価, 今後への展望を, 内外の資料を基に詳細に論じている。

本報告書は, 両研究専門委員会において, 4 年間にわたって蓄積された成果を基に, 核融合炉設計および研究開発の現状と今後の課題を集大成したものである。具体的には, 下記の目次が示すように, 近年の核融合炉研究開発の最新の情報と動力炉概念設計の問題点ならびに燃料・材料に関する広範な調査結果が盛り込まれている。本報告書が会員各位の核融合炉に関する研究活動の策定や成果の確保に役立つことを期待するものである。

目 次 (概 要)

I. トカマク炉研究の進展	V. 超電導マグネットの設計	IX. トカマク炉以外の概念設計
II. 炉心プラズマ設計	VI. 分解修理	X. 核融合炉燃料サイクル
III. 核設計及び遮蔽設計	VII. 安全 性	XI. ブランケット構造材料
IV. 熱構造設計	VIII. 経 済 性	XII. 第 1 壁材料及び他の特殊材料

ご希望の方は学会事務局へ。

◎今秋10月13～15日の3日間, 国立教育会館(虎ノ門)で, 本報告書をテキストとして「核融合炉設計および研究開発」講習会を開催します。詳細は後日「会誌」上で発表いたします。ご期待願います。