

JAERI-M  
92-088

リチウム塩水溶液ブランケットに関する検討

1992年6月

吉田 浩・成瀬 雄二・山岡 光明\* 小原 敦\*  
小野 清\* 小林 重忠\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城  
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日立高速印刷株式会社

## リチウム塩水溶液ブランケットに関する検討

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

吉田 浩・成瀬 雄二・山岡 光明\*

小原 敦\*・小野 清\*・小林 重忠\*

(1992年5月25日受理)

トリチウム増殖ブランケットとしてLiNO<sub>3</sub>やLiOH等のリチウム塩水溶液を増殖材及び冷却材とするリチウム塩水溶液ブランケットが、米国のTIBER計画とITERの概念設計において幅広く検討された。一方、トリチウム技術に関する日米協力として進められているロスアラモス国立研究所のTSTA共同運転試験計画においても、ブランケットトリチウム回収システム(Breeding Blanket Interface)のトリチウム実証試験をTSTA施設を利用して実施する可能性について検討がなされた。

わが国では本ブランケット概念に関する研究はほとんど行われていないことから、著者らは以下のような調査・検討を行い、水溶液ブランケットの特徴を把握するとともにその技術的課題を評価した。

### ①代表的水溶液ブランケット体系のトリチウム増殖性能及び遮蔽特性の評価

Li濃度、<sup>6</sup>Li濃縮度、Be及び鉛、構造材/Be/Li塩水溶液の比率、軽水及び重水、リチウム塩の種類をパラメータとした。

### ②各種リチウム塩の特性の評価

種々のリチウム塩に関する溶解度、腐食特性(構造材との共存性)、放射線分解特性等のデータベース評価

### ③ITERブランケットにおける放射線分解量の推定

Preliminary Study on Lithium-salt Aqueous Solution Blanket

Hiroshi YOSHIDA, Yuji NARUSE, Mitsuaki YAMAOKA<sup>\*</sup>  
Atsushi OHARA<sup>\*</sup>, Kiyoshi ONO<sup>\*</sup> and Shigetada KOBAYASHI<sup>\*</sup>

Department of Fusion Engineering Research  
Naka Fusion Research Establishment  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 25, 1992)

Aqueous solution blanket using lithium salts such as LiNO<sub>3</sub> and LiOH have been studied in the US-TIBER program and ITER conceptual design activity. In the JAERI/LANL collaboration program for the joint operation of TSTA (Tritium Systems Test Assembly), preliminary design work of blanket tritium system for lithium ceramic blanket, aqueous solution blanket and liquid metal blanket, have been performed to investigate technical feasibility of tritium demonstration tests using the TSTA.

Detail study of the aqueous solution blanket concept have not been performed in the Japanese fusion program, so that this study was carried out to investigate features of its concept and to evaluated its technical problems. The following are the major items studied in the present work :

- (i) Nutronics of tritium breeding ratio and shielding performance  
Lithium concentration, Li-60 enrichment, beryllium or lead,  
composition of structural material/beryllium/solution,  
heavy water, different lithium-salts
- (ii) Physico-chemical properties of salts  
Solubility, corrosion characteristics and compatibility with  
structural materials, radiolysis
- (iii) Estimation of radiolysis in ITER aqueous solution blanket

---

\* Toshiba Corporation

Keywords : Fusion Reactor, Blanket, Aqueous Solution Blanket, Lithium Salts, Tritium Breeding Performance, Shielding Performance, Radiolysis, Corrosion, Heavy Water, Neutron Multiplier

## 目 次

1.はじめに .....	1
2.水溶液ブランケットの核特性 .....	1
2.1 トリチウム増殖性能 .....	1
2.2 重水を用いた場合のトリチウム増殖性能 .....	5
2.3 リチウム塩の種類の効果 .....	6
2.4 リチウム塩溶解度とトリチウム増殖性能の関係 .....	7
2.5 遮蔽特性 .....	8
2.6 まとめ .....	9
3.各種リチウム塩の特性 .....	26
3.1 ブランケット材としての選定基準 .....	26
3.2 リチウム塩の溶解度 .....	34
3.3 リチウム塩水溶液の密度 .....	39
3.4 リチウム塩水溶液と構造材（ステンレス鋼）との共存性 .....	48
3.5 リチウム塩水溶液の放射線分解 .....	88
3.6 ITER ブランケットにおける放射線分解量の推定 .....	104
3.7 まとめ .....	105

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Neutronics of Aqueous Solution Blanket .....	1
2.1 Tritium Breeding Performance .....	1
2.2 Neutronic Effects for Heavy Water Blanket .....	5
2.3 Effects of Nitrogen Contained in Lithium-salts .....	6
2.4 Effects of Solubility on Tritium Breeding Performance .....	7
2.5 Shielding Performance .....	8
2.6 Summary .....	9
3. Properties of Lithium-salts .....	26
3.1 Requirements for Blanket Application .....	26
3.2 Solubility of Lithium-salts .....	34
3.3 Density of Aqueous Solution .....	39
3.4 Corrosion Characteristics for Structural Materials .....	48
3.5 Radiolysis of Lithium-salts .....	88
3.6 Estimation of Radiolysis in ITER Blanket .....	104
3.7 Summary .....	105

## 1. はじめに

核融合炉ブランケットにおけるトリチウム増殖にはLi ( $n, \alpha$ ) T反応が利用される。リチウムを含有するトリチウム増殖材としては、 $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{LiAlO}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ ,  $\text{Li}_4\text{iO}_4$ 等のリチウムセラミックス系, Li, LiPb, LiF -  $\text{BeF}_2$ 等の液体金属系及び $\text{LiOH}$ ,  $\text{LiNO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{SO}_4$ 等のリチウム塩系に大別され、増殖材の特性に対応したそれぞれのブランケット構造概念が提案されている。

液体金属系及びリチウム塩系は、いずれも増殖材を液体として使用することからトリチウムの増殖と回収及び熱回収が同時に達成できることが特徴となっている。とくに、リチウム塩水溶液ブランケットは、ブランケット内に増殖材が半永久的に装荷される固体系ブランケットの場合の照射耐久性あるいはブランケット交換の問題が無いこと、液体金属系ブランケットの破損時には想定される二次冷却水や空気との激しい反応が少ないとから、ITERの概念設計段階においてその可能性が幅広く検討された。しかし、これらの検討を通じてリチウム塩水溶液の放射線分解による水素及び窒素の発生、ブランケット構造材及び配管の腐食反応等の本ブランケット概念に固有の問題の解決が簡単ではないことが明らかにされ、ITERでは候補ブランケットから除外されることになった。

一方、トリチウム技術開発に関する日米協力として1987年から進められているロスアラ莫斯国立研究所のTSTA共同運転試験では、TSTA施設を利用した将来の試験項目としてブランケットトリチウム回収システムに関する実証試験の可能性が検討された。この検討では、上記の代表的な3つのブランケット概念を対象とする回収システム (Breeding Blanket Interface) が取り上げられ、ANL (アメリカ), KfK (ドイツ), CFFT (カナダ) 及び原研のトリチウム技術専門家による協力作業が行われた。わが国ではリチウム塩水溶液ブランケットに関する研究が行われていないことから、著者らはこのブランケットの特徴の把握及び今後の検討のためのデータベースを作成することを目的としてリチウム塩水溶液ブランケットのトリチウム増殖及び遮蔽性能、各種リチウム塩の物理化学的な諸特性について幅広く調査・検討するとともに、トリチウム回収システム構成の基本となる放射線分解量をITER条件で評価した。

なお、本報告書は、(株)東芝に調査委託した(1988年)『ブランケットトリチウム処理システムに関する調査』の結果をまとめたものである。

## 2. 水溶液ブランケットの核特性

### 2.1 トリチウム増殖性能

#### 2.1.1 代表的水溶液ブランケット体系

本調査では、以下の4種類の代表的な水溶液ブランケットモデルについてトリチウム増殖比の評価を行った。主な計算パラメータとしてリチウム塩濃度、 ${}^6\text{Li}$ 濃縮度、中性子増倍材の厚み、ま

## 1. はじめに

核融合炉ブランケットにおけるトリチウム増殖にはLi ( $n, \alpha$ ) T反応が利用される。リチウムを含有するトリチウム増殖材としては、 $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{LiAlO}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$ ,  $\text{Li}_4\text{iO}_4$ 等のリチウムセラミックス系, Li, LiPb, LiF – BeF<sub>2</sub>等の液体金属系及びLiOH, LiNO<sub>3</sub>, Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>等のリチウム塩系に大別され、増殖材の特性に対応したそれぞれのブランケット構造概念が提案されている。

液体金属系及びリチウム塩系は、いずれも増殖材を液体として使用することからトリチウムの増殖と回収及び熱回収が同時に達成できることが特徴となっている。とくに、リチウム塩水溶液ブランケットは、ブランケット内に増殖材が半永久的に装荷される固体系ブランケットの場合の照射耐久性あるいはブランケット交換の問題が無いこと、液体金属系ブランケットの破損時には想定される二次冷却水や空気との激しい反応が少ないとから、ITERの概念設計段階においてその可能性が幅広く検討された。しかし、これらの検討を通じてリチウム塩水溶液の放射線分解による水素及び窒素の発生、ブランケット構造材及び配管の腐食反応等の本ブランケット概念に固有の問題の解決が簡単ではないことが明らかにされ、ITERでは候補ブランケットから除外されることになった。

一方、トリチウム技術開発に関する日米協力として1987年から進められているロスアラモス国立研究所のTSTA共同運転試験では、TSTA施設を利用した将来の試験項目としてブランケットトリチウム回収システムに関する実証試験の可能性が検討された。この検討では、上記の代表的な3つのブランケット概念を対象とする回収システム (Breeding Blanket Interface) が取り上げられ、ANL (アメリカ), KfK (ドイツ), CFFTP (カナダ) 及び原研のトリチウム技術専門家による協力作業が行われた。わが国ではリチウム塩水溶液ブランケットに関する研究が行われていないことから、著者らはこのブランケットの特徴の把握及び今後の検討のためのデータベースを作成することを目的としてリチウム塩水溶液ブランケットのトリチウム増殖及び遮蔽性能、各種リチウム塩の物理化学的な諸特性について幅広く調査・検討するとともに、トリチウム回収システム構成の基本となる放射線分解量をITER条件で評価した。

なお、本報告書は、(株) 東芝に調査委託した(1988年)『ブランケットトリチウム処理システムに関する調査』の結果をまとめたものである。

## 2. 水溶液ブランケットの核特性

### 2.1 トリチウム増殖性能

#### 2.1.1 代表的水溶液ブランケット体系

本調査では、以下の4種類の代表的な水溶液ブランケットモデルについてトリチウム増殖比の評価を行った。主な計算パラメータとしてリチウム塩濃度、<sup>6</sup>Li濃縮度、中性子増倍材の厚み、ま

たはプランケットの組成比を選択した。さらに、本プランケットの遮蔽性能を固体増殖プランケットの遮蔽性能と比較検討した。

#### (1) 遮蔽型プランケット

本プランケットは、Fig.2.1.1に示すように従来の中性子増倍材を用いない遮蔽型プランケットの冷却水をリチウム塩水溶液で置換したものである。プランケット部（厚みは約70cm）は、固体増殖プランケットの場合の増殖領域と遮蔽領域の区別がない単純な構造となっている。プランケットの材料組成は、ステンレス鋼（SS）85%，リチウム塩水溶液15%である。第一壁はとくに設けていない。

#### (2) タンク型プランケット

遮蔽型プランケットのトリチウム増殖比を向上させるためリチウム塩水溶液の割合を85%と大幅に高めたプランケット体系である（Fig.2.1.2）。このプランケットでは第一壁（厚み1.5cm）は分離されており、その材料組成はステンレス鋼85%，リチウム塩水溶液15%とした。なお、プランケットと第一壁の厚みの合計は70cmである。

#### (3) 中性子増倍材前置型プランケット

本プランケットは、タンク型プランケット構造を基本とし、第一壁の後方に中性子増倍材層（ベリリウムまたは鉛）を設置した体系である（Fig.2.1.3）。中性子増倍材層は、冷却材（リチウム塩水溶液）で冷却される第一壁（厚み1.5cm）及び第二壁（厚み1cm）を介して冷却される。本体系については、全体の厚み70cmを保持し、中性子増倍材層の厚みを5~15cmの範囲で変化させたときの増殖比を計算した。

#### (4) 中性子増倍材均一混合型プランケット

本プランケットでは、プランケット部の材料組成が構造材15%，ベリリウムとリチウム塩水溶液の均一混合物85%となっている（Fig.2.1.4）。ただし、プランケット各部の寸法はタンク型プランケットと同一している。本体系では、ベリリウムとリチウム塩水溶液の混合比を変化させた場合及びベリリウムを鉛に置き換えた場合について増殖比を計算した。

### 2.1.2 計算方法

中性子輸送計算は、一次元SNコードANISNを用い、 $S_8P_5$ 近似で行った。プランケットの計算体系は、Fig.2.1.1~Fig.2.1.4に示したプラズマ中心を軸とする一次元円筒体系である。核断面積は、中性子42群、ガンマ線21群のGICX40を使用した。プランケット体系の各領域組成の基本となる原子密度をTable2.1.1に示す。

### 2.1.3 計算条件

Table2.1.2に計算条件を示す。

リチウム塩水溶液の濃度は、遮蔽型及びタンク型プランケットについては2.9~20g-Li塩/100ccの範囲で変化させた。中性子増倍材を用いた体系については、2.9g-Li塩/100ccに固定した。

$^{6}Li$ の濃度は、遮蔽型及びタンク型プランケットについては天然組成（7.5%）と50%濃縮、中性子増倍材を用いた体系については50%濃縮に固定した。中性子増倍材を用いた体系では、

非弾性散乱等により中性子スペクトルが低エネルギー側にシフトし、しきい値反応（約2.5MeV以上）である<sup>7</sup>Liによるトリチウム増殖反応の割合が非常に少なくなるので濃縮リチウムを使う必要がある。

## 2. 1.4 計算結果

### (1) 遮蔽型ブランケットのトリチウム増殖比

Liの濃度及び<sup>6</sup>Li濃縮度とトリチウム増殖比（以下、TBRと略す）の関係をFig.2.1.5に、ブランケット内の領域毎のTBRに対する<sup>6</sup>Liと<sup>7</sup>Liの寄与をTable2.1.3に示す。これらより、以下のことが分かる。

天然リチウムを用いた場合のTBRは、Li濃度2.9~20g-Li/100ccの範囲で約0.11~0.44にすぎない。<sup>6</sup>Liを50%に濃縮した場合には、Li濃度が20g-Li/100ccのとき最大のTBR（約0.8）となる。本ブランケット体系では、<sup>6</sup>Li濃縮度を90%に高めても1以上のTBR達成することはできない。一方、<sup>7</sup>LiのTBRへの寄与は天然Liを用いた場合でも1%以下であり、ブランケットの85%を占める水及び構造材による中性子減速効果は極めて大きい。各領域のTBRを見ると、ブランケットの前方30cmの範囲（領域3~領域5）で約95%の増殖が行われている。TBRの観点からは、ブランケットの有効厚みは30~40cmで良いことが分かる。

### (2) タンク型ブランケットのトリチウム増殖比

本ブランケット体系では、構造材の比率を15%に減らしているので遮蔽型ブランケットより高いTBRが期待できる。計算結果をFig.2.1.6及びTable2.1.4に示す。天然Liの場合のTBRは、Li濃度が2.9g-Li/100cc及び20g-Li/100ccのときそれぞれ約0.67及び0.95と大幅に向かっているがLi濃度に対して飽和傾向が現れている。このことから、天然Liブランケットで1以上のTBRの実現は困難と考えられる。50%濃縮Liを用いた場合には、1に近いTBR（最大値は約0.98）が得られる。これらから、本ブランケット体系で1を大幅に上回るTBRを達成することは困難であることが分かる。なお、Li濃度が20g-Li/100ccのときTBRが減少する理由については、後節で検討する。

一方、TBRにおける<sup>7</sup>Liの寄与は、遮蔽ブランケットの場合よりも大きく天然Liの場合には全TBRの数%を占める。これは、高速中性子に対する減速効果が水よりも大きい構造材（ステンレス鋼）の割合が減少していることによる。また、全TBRの約95%は、ブランケット前方33cm（領域3~領域6）で占められており、遮蔽型ブランケットとほぼ同様の結果となっている。

### (3) 中性子増倍材前置型ブランケットのトリチウム増殖比

ベリリウムまたは鉛の厚みとTBRの関係をFig.2.1.7に、各領域におけるLi同位体のTBRへの寄与をTable2.1.5に示す。ここで、Liの濃度は2.9g-Li/100cc、<sup>6</sup>Li濃縮度は50%である。本ブランケット体系では増倍材層の前後に冷却壁（第一及び第二壁）が設置されるが、図中で増倍材厚みが0の場合には、第二壁は設けられていない。図より、ベリリウム及び鉛のいずれの場合も増倍材層の厚みとともにTBRが増加すること（5cm以上でTBRは、1.1以上となる）、鉛の増倍材効果がベリリウムよりやや大きいことが分かる。しかし、増倍材層の厚みの効果は10cm以上では飽和傾向にあり、15cm以上としてもTBRの大幅な向上は期待できない。また、増倍材層厚み10cmのとき、構造材の比率を15%から5%に減少してもTBRの改善効果は余り

大きくないことが分かる。ベリリウム増倍材の場合には、領域3（第一壁）におけるTBRが増倍材のないタンク型ブランケットの場合よりも大幅に増加する。これは、ベリリウムによる中性子の後方散乱の効果が現れるためであり、ベリリウムの厚みが増すほど領域3のTBRは大きくなる。鉛のばあいには、このような効果は大きくない。なお、増倍材層による中性子減速効果のため、<sup>7</sup>LiのTBRにおける寄与は1%以下と減少する。領域3～領域7のブランケット範囲（厚み27.5cm）におけるTBRは、全TBRの92～97%を占める（増倍材層の厚みに依存）。

#### (4) 中性子増倍材均一混合型ブランケットのトリチウム増殖比

ベリリウムとリチウム塩水溶液の混合比率（体積比）とTBRの関係をFig.2.1.8に示す。ここで、Liの濃度は2.9g-Li/100cc、<sup>6</sup>Li濃縮度は50%である。図は、構造材比率を15%に固定した場合である。また、ベリリウムとリチウム塩水溶液の混合物に対する構造比の比率を15%，10%，5%と減少した場合のTBRをFig.2.1.9に示す。ここで、Be/Li塩水溶液の体積比率は3.25/1に固定している。

まず、ベリリウム及び鉛の効果を以下に比較検討する。

##### ① ベリリウムの効果

Fig.2.1.8より、溶液中のベリリウムの比率を増加するとTBRは上昇するが、Be/Li溶液の比率が65%/20%のとき最大値（TBR=約1.27）を取ることが分かる。これは、ベリリウムの体積比増加によるTBRの改善効果とリチウム塩水溶液の体積比減少によるTBRの低下効果が競合するために生ずる傾向である。領域毎のTBRについては、厚み34.5cmで95%の増殖が行われており、他のブランケット体系の場合とほぼ同じである。

##### ② 鉛の効果

増倍材に鉛を用いた場合には、Fig.2.1.8に見られるようにTBRはやや低下する。これは、中性子増倍材前置型ブランケットにおける鉛の効果（ベリリウムより高い増倍効果）とは異なる。この原因を明らかにするため、両ブランケットの第一壁におけるTBRを以下に比較した。

	第一壁TBR	全TBR
Be前面設置（10cm）	0.28	1.22
Pb前面設置（10cm）	0.07	1.26
Be均一混合（65%）*	0.06	1.27
Pb均一混合（65%）*	0.05	1.14

\* 第二壁のTBRを含む。

Be前面設置の場合には、ベリリウムによる中性子の後方散乱効果が大きいため第一壁のTBR大幅に向上するが同時に第一壁での中性子吸収も大きい。この結果、全TBRは、Pb前面設置の場合よりも小さくなる。一方、均一混合体系では、いずれの増倍材の場合も第一及び第二壁においてこのような効果が生じないため、全体としての増倍効果はベリリウムの方が大きくなる。

一方、構造材の比率を減らす場合の効果は、Fig.2.1.9に見られるようにTBRが単調増加する傾向にあり、構造材比率5%のとき1.5を上回る増殖性能が得られる。

以上のケーススタディの内の主な例について、領域毎のLi同位体のTBRへの寄与をTable2.1.6に示す。

(5)  ${}^6\text{Li}$ 濃縮度を90%に高めた場合のTBR

本検討では、以下の5ケースについて90%濃縮リチウム用いた場合の増殖性能を評価した。

プランケット体系	構造材 (%)	Li 塩水溶液 (%)	Li 濃度 (g/100cc)
遮蔽型	85	15	2.9
遮蔽型	85	15	20
タンク型	15	85	2.9
タンク型	85	15	20
均一混合型	15	20 (Be65)	2.9

領域毎の計算結果をTable2.1.7に示す。

遮蔽型の場合、増殖性能における ${}^7\text{Li}$ の寄与は極めて小さく、 ${}^6\text{Li}$ 濃度の上昇(50%から90%)によりTBRは約30%(Li濃度2.9g/100cc)及び約9%(Li濃度20g/100cc)増加する。タンク型の場合には、50%以上の ${}^6\text{Li}$ 濃縮度ではTBRの飽和傾向が著しい半面、高濃度溶液になると ${}^7\text{Li}$ の寄与が増大する。このため、Li濃度20g/100ccのときのTBRは ${}^6\text{Li}$ 濃度の上昇(50%から90%)により約3%減少する。これは、 ${}^7\text{Li} (n, n', \alpha) T$ 反応の寄与が0.037から0.008に減少するためである。均一混合型では、 ${}^7\text{Li}$ の寄与は極めて小さく、 ${}^6\text{Li}$ 濃度の上昇(50%から90%)によりTBRは約7%増加する。

## (6) トリチウム増殖反応に関する実効断面積

代表的な水溶液プランケットにおけるトリチウム増殖反応の実効断面積をTable2.1.8に示す。

## 2.2 重水を用いた場合のトリチウム増殖性能

以上の検討では、リチウム塩水溶液の媒体には軽水を想定した。軽水に比べ中性子吸収断面積が小さく、かつ高エネルギー(約4MeV以上)範囲で( $n, 2n$ )反応を起こす重水は、中性子経済の観点にからは有利と考えられる。一方、重水の中性子減速能は、軽水に比べ劣るので中性子スペクトルが軽水の場合とは異なる。トリチウム増殖性に及ぼす重水の効果を明らかにするため、以下の検討を行った。

## (1) 計算条件

## (i) リチウム塩水溶液の原子数密度

リチウム塩濃度 : 2.9g/100cc

${}^6\text{Li}$ 濃縮度 : 50%

D :  $6.655 \times 10^{22}/\text{cc}$

O :  $3.327 \times 10^{22}/\text{cc}$

${}^6\text{Li}$  :  $1.282 \times 10^{21}/\text{cc}$

${}^7\text{Li}$  :  $1.282 \times 10^{21}/\text{cc}$

## (ii) プランケット体系

遮蔽型

タンク型

中性子増倍材前面設置型 (Be厚み10cm)

中性子増倍材均一混合型

## (2) 計算結果

トリチウム増殖比の計算結果を、Table2.2.1に示す。表中、軽水ブランケットのTBRも対比しているが、均一混合型については最大値を示した。重水を使用したことによってTBRが増加するブランケットはタンク型のみであり他のブランケット体系ではむしろ減少する傾向が見られる。各ブランケットについて、重水の効果を説明する。

### (i) 遮蔽型

本ブランケットでは、構造材の比率が85%（重水の比率15%）と高いため、構造材の中性子吸収によるTBRの低下が大きい。とくに、ステンレス鋼中のモリブデンは約100eV～10eVの範囲で大きな共鳴吸収が断面積を持っているので、減速能が軽水よりも劣る重水の場合中性子の共鳴吸収がより多くなることが考えられる。

### (ii) タンク型

この場合には、構造材の比率が15%（重水の比率85%）と低いので前記の共鳴吸収の寄与は相対的に小さくなり、高エネルギー中性子の( $n, 2n$ )反応による増倍効果も加わってTBRが増加する。ただし、 $^7\text{Li}$ のTBRへの寄与については、軽水の場合と同一であり、重水の効果は無い。

### (iii) 中性子増倍材前面設置型 (Be厚み10cm)

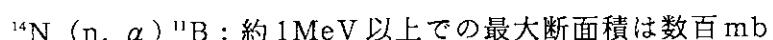
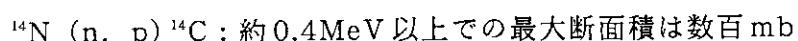
このブランケットでは、前面に設置したベリリウムの( $n, 2n$ )反応によって中性子が減速されるため、重水の( $n, 2n$ )反応は余り期待できない。このため、モリブデンによる中性子の共鳴吸収が無視できない重水ブランケットのTBRは軽水の場合よりもやや減少する。

### (iv) 中性子増倍材均一混合型

本ブランケットの場合もベリリウムによる中性子の減速効果、重水の( $n, 2n$ )反応およびモリブデンによる中性子の共鳴吸収の効果が競合する結果、軽水の場合よりも小さいTBRとなる。なお、Table2.2.2に重水溶液-ベリリウムの混合比率とTBRの関係をまとめた。ベリリウムの比率を増すと水溶液の比率が減少するため、増殖物質及び中性子減速効果が減少し、結果的にはTBRは減少傾向となる。最適のBe/重水水溶液/構造材比率(65/20/15)のときのTBRは、1.232である。

## 2.3 リチウム塩の種類の効果

2.1項及び2.2項の検討では水溶液中のLi濃度を計算パラメータとしたが、リチウム塩の種類の効果については考慮しなかった。しかし、高エネルギー中性子に対する吸収断面積が大きい窒素、イオウ等を含む水溶液ブランケットでは、リチウム塩の種類によってはTBRに大きな影響が現れることが考えられる。例えば、天然に存在する窒素の大部分を占める $^{14}\text{N}$ は、高エネルギー領域の中性子を吸収して次の反応を起こす。



そこで、タンク型ブランケット体系を対象にして、窒素を含有する硝酸塩ブランケットと窒素を含まない水酸化リチウムブランケットの比較検討を行った。

### (1) 塩水溶液の原子密度

$^6\text{Li}$ を濃縮度50%，Li濃度を2.9g／100ccとし、硝酸リチウム水溶液の窒素の原子密度はLi原子密度と同じと仮定したときの各リチウム塩水溶液における原子密度は次の通りである。

硝酸リチウム水溶液	水酸化リチウム水溶液
H : $6.692 \times 10^{22} / \text{cc}$	H : $6.692 \times 10^{22} / \text{cc}$
O : $3.346 \times 10^{22} / \text{cc}$	O : $3.346 \times 10^{22} / \text{cc}$
N : $2.546 \times 10^{22} / \text{cc}$	$^6\text{Li}$ : $1.282 \times 10^{21} / \text{cc}$
$^6\text{Li}$ : $1.282 \times 10^{21} / \text{cc}$	$^7\text{Li}$ : $1.282 \times 10^{21} / \text{cc}$
$^7\text{Li}$ : $1.282 \times 10^{21} / \text{cc}$	

### (2) トリチウム増殖性能

各ブランケットのTBRの計算結果を以下に示す。

	硝酸リチウム水溶液	水酸化リチウム水溶液
$^6\text{Li}$ によるTBR	0.846	0.876
$^7\text{Li}$ によるTBR	0.003	0.005
全TBR	0.849	0.881

この計算例では、窒素の中性子吸収効果による増殖性能の低下は全TBRで約4%であり、 $^7\text{Li}$ におけるTBRの減少割合は40%にも及んでいる( $^6\text{Li}$ では約3%)。TBRの減少度合いは、水溶液中の窒素濃度が高いほど大きくなると考えられる。

## 2.4 リチウム塩溶解度とトリチウム増殖性能の関係

水溶液ブランケットの候補増殖材と考えられる代表的リチウム塩の水に対する溶解度データ(Table 2.4.1)より、水100ccあたり溶解するLi重量(g-Li)の概略値を以下に示す。

溶液温度(°C)	LiOH	$\text{Li}_2\text{SO}_4$	$\text{LiNO}_3$	$\text{LiNO}_2$
0	3.5	4.5	5.4	9.3
20	3.6	4.4	7	12.5
50	4.0	4.2	16	20.7
100	5.5	3.9	23.6	150

3.3項の検討結果から、全TBRに対する窒素の減少効果は余り大きくないと言える。一方、トリチウム増殖比は水溶液中のLi濃度に大きく依存する(Fig.2.1.5参照)。つまり、水100ccに溶解できるLi量の大きいリチウム塩ほど増殖性能が高いので、例えばITERブランケットの冷却水温度条件(最高100°C)では、 $\text{LiNO}_2$ 、 $\text{LiNO}_3$ が有利な候補材となる。

## 2.5 遮蔽特性

タンク型プランケットや中性子増倍材を利用したプランケットでは、遮蔽型プランケットよりも構造材の占める割合が減少するので、TFコイルや作業環境に対する遮蔽の要求はより厳しくなるものと思われる。そこで、TFコイル（超電導磁石）における最大高速中性子束、最大全中性子束、最大ガンマ線束、及びTFコイルの総核発熱を比較検討した。また、トリチウム増殖性能の約95%はプラズマに近い厚み30~40cmの範囲で占められる（2.1項参照）ことから、各プランケット体系についてプランケット後方の30~40cmを遮蔽型プランケットに置換した場合の遮蔽効果も検討した。

計算結果を、Table2.5.1に示す。表中の値は、遮蔽型プランケット（ただし、Li塩は冷却材中に含まれない）に対して規格化している。ケースAとケースBは、プランケットの後方部分を遮蔽型プランケットで置換しない場合及び置換した場合である。この検討から明らかになつたことを以下に列挙する。

### (1) 遮蔽型プランケット

本プランケットでは、リチウム塩水溶液を含む場合の遮蔽特性がリチウム塩水溶液を含まない場合よりも改善されるが、その差は小さい。

### (2) ケースAのプランケット体系

本プランケットの遮蔽特性は、以下に示すリチウム塩水溶液を含まない遮蔽型プランケットの遮蔽特性との比率から分かるように著しく低下する。

- 最大高速中性子束 : 8~10倍
- 最大全中性子束 : 6~7倍
- 最大ガンマ線束 : 16~22倍
- 最大総核発熱 : 11~14倍

のことから、構造材の比率を減らし、水またはベリリウムの比率を増やすと高速中性子束及びガンマ線束と中性子束との比が増加し、遮蔽性低下する傾向にあることが分かった。

### (3) ケースBのプランケット体系

ケースAの遮蔽特性をリチウム塩水溶液を含まない遮蔽型プランケットと比較した値を以下に示す。

- 最大高速中性子束 : 4~7倍
- 最大全中性子束 : 4~6倍
- 最大ガンマ線束 : 4~6倍
- 最大総核発熱 : 4~6倍

ケースBの場合、ケースAよりも遮蔽特性がかなり改善されることからプランケット後方を遮蔽型に置換することが有効であることが分かる。ちなみに、この置換によるTBRの低下は、1~4%程度である。

以上の検討結果から、水溶液ブランケットでは、TFコイルに対する遮蔽性をさらに高めるために、SS遮蔽体（SS85%，水15%）あるいはB<sub>4</sub>C遮蔽体をブランケットの後方に設置するなどの対策が不可欠である事が分かる。ちなみに、Be65%，Li水溶液20%，構造材15%の均一混合型において遮蔽型ブランケットと同等の遮蔽性を得るには、トリチウム増殖に必要なブランケット部分の厚みを35cm（第一壁を含む）としたとき遮蔽体の厚みは45cmとなる。

## 2.6 まとめ

水溶液ブランケットのトリチウム増殖特性及び遮蔽特性に関する検討結果を以下に要約する。

### 2.6.1 トリチウム増殖特性

遮蔽型ブランケット体系（構造材85%，冷却材15%）において、冷却材にリチウム塩水溶液を用いたときのTBRは、Li濃度2.9g-Li/100cc, 90%濃縮Liの場合でも高々0.55程度である。構造材と冷却材の比率をそれぞれ15%，85%としたタンク型ブランケット体系の場合には、Li濃度2.9g-Li/100cc, 50%濃縮Liの条件でTBRは0.9となるが、<sup>6</sup>Li濃縮度を90%としてもTBRはほとんど増加しない。一方、タンク型ブランケット体系の前面に中性子増倍材層（厚み10cmのベリリウムあるいは鉛）を設置した場合のTBRは約1.2となる。鉛の増倍材効果の方がベリリウムよりもやや大きい。また、ベリリウムとリチウム塩水溶液の均一混合ブランケット体系において、混合比率を最適化した場合のTBRは1.3～1.5となる。この体系のTBRは<sup>6</sup>Liの濃縮度及び構造材の比率に敏感に依存する。軽水の代わりに重水を用いた場合には、構造材に含まれるモリブデンの中性子の共鳴吸収効果と重水の中性子増倍効果（n, 2n）が競合するので、重水の使用によるTBRの大幅な改善は期待できない。リチウム塩の種類の効果については、高エネルギー中性子の吸収断面積の大きい窒素がTBRを数%減少させることが分かった。

### 2.6.2 遮蔽特性

遮蔽型ブランケット体系の場合には、リチウム塩水溶液を用いても遮蔽特性は低下しない。しかし、タンク型や中性子増倍材を用いるブランケット体系の場合には、遮蔽特性がかなり低下するので、厚み40cm程度のSS遮蔽体あるいはB<sub>4</sub>C遮蔽体をブランケットの後方に設置することが不可欠となる。しかし、トリチウム増殖比の95%は、ブランケットの前方領域（厚み30～40cm）で占められているので、増殖部と遮蔽体部を合計した厚みを、80cm程度にすることは可能であろう。

Table 2.1.1 水溶液ブランケット内の原子密度

composition	nuclide	atom density ( n /cm <sup>3</sup> )
316SS	{ Mo Cr Ni Fe	{ 1, 255 × 10 <sup>21</sup> 1, 575 × 10 <sup>22</sup> 9, 848 × 10 <sup>21</sup> 5, 909 × 10 <sup>22</sup>
H <sub>2</sub> O	{ H O	{ 6, 692 × 10 <sup>22</sup> 3, 346 × 10 <sup>22</sup>
B e	B e	1, 236 × 10 <sup>23*</sup>
P b	P b	3, 299 × 10 <sup>22</sup>
C u	C u	8, 464 × 10 <sup>22</sup>
Li solution ( • 2.9 g Li /100cc aq. • Natural Li )	{ <sup>6</sup> Li <sup>7</sup> Li H O	{ 1, 888 × 10 <sup>20</sup> 2, 328 × 10 <sup>21</sup> 6, 692 × 10 <sup>22</sup> 3, 346 × 10 <sup>22</sup>
Li solution ( • 2.9 g Li /100cc aq. • 50% <sup>6</sup> Li )	{ <sup>6</sup> Li <sup>7</sup> Li H O	{ 1, 282 × 10 <sup>21</sup> 1, 282 × 10 <sup>21</sup> 6, 692 × 10 <sup>22</sup> 3, 346 × 10 <sup>22</sup>
Li solution ( • 2.9 g Li /100cc aq. • 90% <sup>6</sup> Li )	{ <sup>6</sup> Li <sup>7</sup> Li H O	{ 2, 346 × 10 <sup>21</sup> 2, 607 × 10 <sup>20</sup> 6, 692 × 10 <sup>22</sup> 3, 346 × 10 <sup>22</sup>

\* 100 % T, D,

Table 2.1.2 水溶液ブランケット核特性 - スタディ条件

type of blanket	Li concentration (g · Li / 100cc · aq.)	Li enrichment (%)	Li solution volume ratio (%)	SS volume ratio (%)	Be		Pb thickness (cm) volume ratio (%)	
					thickness (cm)	volume ratio (%)		
shield type	2.9	Nat. / 50	15	85	↓			
	8.7				↓			
	14.5				↓			
tank type	2.9	Nat. / 50	85	15	↓			
	8.7				↓			
	14.5				↓			
multiplier - breeder separate type	2.9	50	85	15	5 / 10 / 15 (cm)	-		
			95	5	-	-		
			85	15	-	-		
multiplier - breeder mixed type	2.9	50	95	5	5 / 10 / 15 (cm)	-		
			85	5	-	-		
			95	5	-	-		
↓								

Table 2.1.3 遮蔽型ブランケットの領域毎のトリチウム増殖性能

area No.	2.9 g Li *		14.5 g Li Nat. Li		20 g Li Nat. Li		2.9 g Li 50% $^6$ Li		14.5 g Li 50% $^6$ Li		20 g Li 50% $^6$ Li	
	T 6 **	T 7 **	T 6	T 7	T 6	T 7	T 6	T 7	T 6	T 7	T 6	T 7
3	0.057	0.001	0.193	0.005	0.234	0.007	0.228	0.001	0.412	0.003	0.443	0.004
4	0.033	~ 0	0.108	0.001	0.129	0.001	0.127	~ 0	0.219	0.001	0.232	0.001
5	0.013	~ 0	0.041	~ 0	0.049	~ 0	0.049	~ 0	0.081	~ 0	0.085	~ 0
6	0.004	~ 0	0.013	~ 0	0.015	~ 0	0.016	~ 0	0.025	~ 0	0.026	~ 0
7	0.001	~ 0	0.004	~ 0	0.004	~ 0	0.005	~ 0	0.007	~ 0	0.007	~ 0
8	~ 0	~ 0	0.001	~ 0	0.001	~ 0	0.001	~ 0	0.002	~ 0	0.002	~ 0
9	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0	0.001	~ 0	0.001	~ 0
a total	0.108	0.001	0.360	0.006	0.432	0.008	0.426	0.001	0.747	0.004	0.796	0.005
the sum total	0.109		0.366		0.440		0.427		0.751		0.801	

\* per 100cc • aq.    \*\* T 6 :  $^6$ Li(n, a) T,    T 7 :  $^7$ Li(n, n', a) T

Table 2.1.4 タンク型ブランケットの領域毎のトリチウム増殖性能

area No.	2.9 g Li *		14.5 g Li Nat. Li		20 g Li Nat. Li		2.9 g Li 50% $^6$ Li		14.5 g Li 50% $^6$ Li		20 g Li 50% $^6$ Li		Remark
	T 6 **	T 7 **	T 6	T 7	T 6	T 7	T 6	T 7	T 6	T 7	T 6	T 7	
3	0.007	~ 0	0.014	0.002	0.016	0.002	0.014	~ 0	0.021	0.001	0.023	0.001	first wall
4	0.403	0.006	0.549	0.031	0.571	0.043	0.544	0.003	0.607	0.017	0.620	0.024	
5	0.158	0.002	0.189	0.010	0.191	0.014	0.195	0.001	0.199	0.006	0.198	0.008	
6	0.062	0.001	0.069	0.004	0.067	0.005	0.076	0.001	0.073	0.002	0.070	0.003	
7	0.024	~ 0	0.025	0.001	0.023	0.002	0.030	~ 0	0.026	0.001	0.024	0.001	
8	0.009	~ 0	0.009	~ 0	0.008	~ 0	0.011	~ 0	0.009	~ 0	0.008	~ 0	
9	0.004	~ 0	0.004	~ 0	0.003	~ 0	0.006	~ 0	0.004	~ 0	0.003	~ 0	
a total	0.667	0.009	0.859	0.043	0.879	0.066	0.876	0.005	0.939	0.027	0.946	0.037	
the sum total	0.676		0.907		0.945		0.881		0.966		0.983		

\* per 100cc • aq.    \*\* T 6 :  $^6$  Li(n,  $\alpha$ ) T,    T 7 :  $^7$  Li(n, n',  $\alpha$ ) T

Table 2.1.5 中性子増倍材前置型ブランケットの領域毎のトリチウム増殖性能

- 2.9 g Li / 100cc · aq.
- 50%  $^6$ Li

area number	5 cm* Be		10cm Be		10cm Be		5 cm Pb		10cm Pb		10cm Pb		Remark
	T 6 **	T 7 **	SS 15%	T 6	T 7	SS 5%	T 6	T 7	SS 15%	T 6	T 7	SS 5%	
3	0.076	~ 0	0.192	~ 0	0.189	~ 0	0.029	~ 0	0.045	~ 0	0.043	~ 0	first wall
5	0.043	~ 0	0.089	~ 0	0.086	~ 0	0.021	~ 0	0.028	~ 0	0.027	~ 0	second wall
6	0.773	0.002	0.782	0.001	0.804	0.001	0.854	0.002	1.010	0.001	1.042	0.001	
7	0.139	0.001	0.098	0.001	0.098	0.001	0.152	0.001	0.125	~ 0	0.119	0.001	
8	0.052	~ 0	0.035	~ 0	0.039	~ 0	0.048	~ 0	0.031	~ 0	0.033	~ 0	
9	0.021	~ 0	0.014	~ 0	0.017	~ 0	0.019	~ 0	0.012	~ 0	0.014	~ 0	
1 0	0.009	~ 0	0.006	~ 0	0.007	~ 0	0.008	~ 0	0.005	~ 0	0.007	~ 0	
1 1	0.005	~ 0	0.003	~ 0	0.004	~ 0	0.005	~ 0	0.002	~ 0	0.004	~ 0	
a total	1.118	0.003	1.219	0.002	1.244	0.002	1.136	0.003	1.258	0.001	1.289	0.002	
the sum total	1.121		1.221		1.246		1.139		1.259		1.291		

\* thickness    \*\* T 6 :  $^6$ Li(n,  $\alpha$ ) T , T 7 :  $^7$ Li(n, n',  $\alpha$ ) T

Table 2.1.6 中性子増倍材均一混合型ブランケットの領域毎のトリチウム増殖性能

area No.	Be 20 %			Be 65 %			Li solution 20 %			Be 65 %			Li solution 22.5%			S.S.15 %			Be 65 %			Li solution 20 %			Be 65 %			Li solution 15 %			Remark		
	Li solution 65 %			S.S.15 %			Li solution 20 %			S.S.15 %			Li solution 22.5%			S.S.5 %			Li solution 20 %			S.S.15 %			Li solution 15 %								
	T 6	T 7		T 6	T 7		T 6	T 7		T 6	T 7		T 6	T 7		T 6	T 7		T 6	T 7		T 6	T 7		T 6	T 7							
3	0.020	~ 0		0.055	~ 0		0.056	~ 0		0.049	~ 0		0.049	~ 0		0.049	~ 0		0.049	~ 0		0.049	~ 0		0.049	~ 0		first wall					
4	0.622	0.003		0.668	0.001		0.791	0.001		0.541	0.001		0.541	0.001		0.541	0.001		0.541	0.001		0.541	0.001		0.541	0.001							
5	0.239	~ 0		0.346	~ 0		0.419	~ 0		0.327	~ 0		0.327	~ 0		0.327	~ 0		0.327	~ 0		0.327	~ 0		0.327	~ 0							
6	0.091	~ 0		0.132	~ 0		0.169	~ 0		0.142	~ 0		0.142	~ 0		0.142	~ 0		0.142	~ 0		0.142	~ 0		0.142	~ 0							
7	0.034	~ 0		0.047	~ 0		0.065	~ 0		0.054	~ 0		0.054	~ 0		0.054	~ 0		0.054	~ 0		0.054	~ 0		0.054	~ 0							
8	0.012	~ 0		0.016	~ 0		0.024	~ 0		0.019	~ 0		0.019	~ 0		0.019	~ 0		0.019	~ 0		0.019	~ 0		0.019	~ 0							
9	0.006	~ 0		0.006	~ 0		0.010	~ 0		0.008	~ 0		0.008	~ 0		0.008	~ 0		0.008	~ 0		0.008	~ 0		0.008	~ 0							
a total	1.024	0.005		1.270	0.001		1.534	0.001		1.140	0.001		1.140	0.001		1.140	0.001		1.140	0.001		1.140	0.001		1.140	0.001							
the sum total	1.029			1.271			1.535			1.141			1.141			1.141			1.141			1.141			1.141			1.141					

\* 2.8 g · Li / 100cc • aq. , 50% <sup>6</sup>Li      \*\* T 6 : <sup>6</sup>Li(n, n' , a) T      , T 7 : <sup>7</sup>Li(n, n' , a) T

Table 2. 1.7 90%濃縮<sup>6</sup>Li を用いた場合のトリチウム増殖性能

No.	area 2.9 g Li/100cc aq.	shield type(ss85%)		shield type(ss85%)		tank type(ss15%)		tank type(ss15%)		multiplier-breeder	
		T 6	T 7	T 6	T 7	T 6	T 7	T 6	T 7	mixed type(SS15%,Be65%) 2.9 g Li/100cc aq.	2.9 g Li/100cc aq.
3	0.301	0.001	0.492	0.001	0.017	~ 0	0.025	~ 0	0.066	~ 0	
4	0.166	~ 0	0.251	~ 0	0.564	0.001	0.628	0.005	0.728	~ 0	
5	0.063	~ 0	0.090	~ 0	0.199	~ 0	0.197	0.002	0.366	~ 0	
6	0.020	~ 0	0.027	~ 0	0.078	~ 0	0.070	0.001	0.138	~ 0	
7	0.006	~ 0	0.008	~ 0	0.030	~ 0	0.024	~ 0	0.049	~ 0	
8	0.002	~ 0	0.002	~ 0	0.012	~ 0	0.008	~ 0	0.017	~ 0	
9	~ 0	~ 0	0.001	~ 0	0.006	~ 0	0.003	~ 0	0.007	~ 0	
a total	0.558	0	0.871	0.001	0.906	0.001	0.955	0.008	1.371	~ 0	
the sum total	0.558		0.872		0.907		0.963		1.371		

Table 2. 1. 8 トリチウム増殖反応の実効断面積

type of blanket *	$^6\text{Li} (\alpha, \alpha) \text{T}$	$\tau_{\text{Li}} (n, n', \alpha)$
shield type SS85%	19. 8	0. 0470
tank type SS15%	22. 1	0. 140
Be multiplier - breeder separate type SS15%	50. 0	0. 0791
Pb multiplier - breeder separate type SS15%	42. 2	0. 0383
Be multiplier - breeder mixed type(Be65%, SS15%)	44. 2	0. 0623
Pb multiplier - breeder mixed type(Pb65%, SS15%)	31. 6	0. 0411

\* 2.8 g Li/100cc Li aq.  
\*\* 10 cm

Table 2.2.1 重水を用いた場合のトリチウム増殖性能

プランケットモデル (すべて50% ${}^6\text{Li}$ 濃縮)		トリチウム増殖比*			備考
		${}^6\text{T}$	${}^7\text{T}$	${}^{6+7}\text{T}$	
遮 蔽 型	2.9g · Li / 100cc aq.	0.302 (0.426) **	0.001 (0.001)	0.303 (0.427)	水溶液 15% SS 85%
	20 g · Li / 100cc aq.	0.679 (0.796)	0.005 (0.005)	0.684 (0.801)	
タ ン ク 型	2.9g · Li / 100cc aq.	0.960 (0.876)	0.005 (0.005)	0.965 (0.881)	水溶液 85% SS 15%
	20 g · Li / 100cc aq.	1.050 (0.946)	0.039 (0.037)	1.089 (0.983)	
Be 増倍材全面設置型 Be10cm 厚さ, 2.9g · Li / 100cc aq.		1.192 (1.219)	0.003 (0.003)	1.195 (1.222)	
Be 増倍材一様混合型 2.9g · Li / 100cc aq.		1.231 (1.270)	0.001 (0.001)	1.232 (1.271)	水溶液 20% Be 65% SS 15%

\*  ${}^6\text{T}$ :  ${}^6\text{Li}$  によるトリチウム増殖\*  ${}^7\text{T}$ :  ${}^7\text{Li}$  によるトリチウム増殖

\*\* 軽水を用いた場合

Table 2.2.2 水溶液と Be の混合比の効果  
(Be 均一混合型, 重水使用の場合)

混合比 水溶液 / Be / SS (%)	トリチウム増殖比		
	${}^6\text{T}$	${}^7\text{T}$	${}^{6+7}\text{T}$
12.5 / 72.5 / 15	1.171	0.001	1.172
20 / 65 / 15	1.231	0.001	1.232
30 / 55 / 15	1.247	0.002	1.248
40 / 45 / 15	1.224	0.003	1.227

条件 . 2.9g · Li / 100cc aq.  
. 50%  ${}^6\text{Li}$

Table 2.4.1 代表的リチウム塩の溶解度

 $\text{LiOH}$ 

t (C)	g/100ccH <sub>2</sub> O	wt%
0	11.91	10.64
10	12.11	10.80
20	12.35	10.99
25	12.54	11.14
30	12.70	11.27
40	13.22	11.68
50	13.79	12.12
60	14.63	12.76
80	16.56	14.21
100	19.12	16.05

 $\text{Li}_2\text{SO}_4$ 

t (C)	g/100ccH <sub>2</sub> O	wt%
0.6	36.07	26.51
14.0	35.26	26.07
16.7	35.06	25.96
19.6	34.86	25.85
31.8	34.17	25.47
38.0	33.83	25.28
43.7	33.33	25.00
51.6	33.01	24.82
52.4	32.82	24.71
65.7	32.17	24.34
77.0	31.67	24.05
94.8	31.16	23.76
103	31.10	23.72

 $\text{LiNO}_3$ 

t (C)	g/100ccH <sub>2</sub> O	wt%
0.1	53.37	34.8
10.5	61.03	37.9
12.1	61.81	38.2
13.75	64.74	39.3
19.05	67.79	40.4
22.1	75.13	42.9
27.55	89.75	47.3
29.47	115.84	53.67
29.55	138.27	58.03
43.4	155.10	60.8
50.5	158.40	61.3
55	170.27	63.0
60	174.73	63.6
64.2	184.90	64.9
70.9	194.99	66.1
80	204.0	67.11
90	217.8	68.54
100	233.7	70.03
110	251.6	71.56

 $\text{LiNO}_2$ 

t (C)	g/100ccH <sub>2</sub> O	wt%
0	70.94	41.5
19	95.69	48.9
25	103.67	50.9
38.5	124.72	55.5
42	132.02	56.9
49	153.81	60.6
49.5	157.73	61.2
65	176.24	63.8
81.5	219.49	68.7
91	262.32	72.4
96	1119	91.8

Table 2.5.1 水溶液ブランケットの遮蔽性能

type of blanket *		TFC	Maximum *3 fast neutron flux	TFC	Maximum *3 total neutron flux	TFC	Maximum *3 total $\gamma$ ray flux	TFC	Maximum *3 total nuclear heat	Tritium Breeding ratio
shield type	SS85%	0. 9 4	0. 9 8	0. 9 0	0. 9 4	0. 9 4	0. 9 4	0. 9 4	0. 9 4	0. 4 2 6
tank type	A	1 0. 0	6. 5	2 1. 5	1 4. 1	1 4. 1	1 4. 1	1 4. 1	1 4. 1	0. 8 8 1
	B	4. 7	4. 5	4. 4	4. 4	4. 5	4. 5	4. 5	4. 5	0. 8 6 3
Be multiplier - breeder separate type	A	9. 4	6. 3	2 1. 5	1 4. 5	1 4. 5	1 4. 5	1 4. 5	1 4. 5	1. 2 2 0
	B	6. 5	5. 8	5. 9	5. 9	5. 9	5. 9	5. 9	5. 9	1. 2 1 1
Pb multiplier - breeder separate type	A	8. 8	6. 0	1 7. 3	1 1. 8	1 1. 8	1 1. 8	1 1. 8	1 1. 8	1. 2 5 9
	B	5. 4	5. 3	5. 4	5. 4	5. 5	5. 5	5. 5	5. 5	1. 2 5 2
Be multiplier - breeder mixed type(Be65%, SS15%)	A	8. 2	6. 8	1 6. 3	1 1. 2	1 1. 2	1 1. 2	1 1. 2	1 1. 2	1. 2 7 1
	B	3. 9	3. 8	3. 7	3. 8	3. 8	3. 8	3. 8	3. 8	1. 2 2 6
	C	0. 9 4	0. 9 5	0. 8 8	0. 9 4	0. 9 4	0. 9 4	0. 9 4	0. 9 4	1. 2 2 6
	D	2. 6	2. 0	3. 4	2. 5	2. 5	2. 5	2. 5	2. 5	1. 2 0 6

\* 2.8 g Li/100cc Li aq., 50%  $^6_{\text{Li}}$ 

\*\* 10 cm

\*3 the base value : Shield type SS85%, H2O 15%  
B : Backside 35 cm shield C : Backside 45 cm shield

D : Backside 35 cm shield &amp; 10 cm B4C

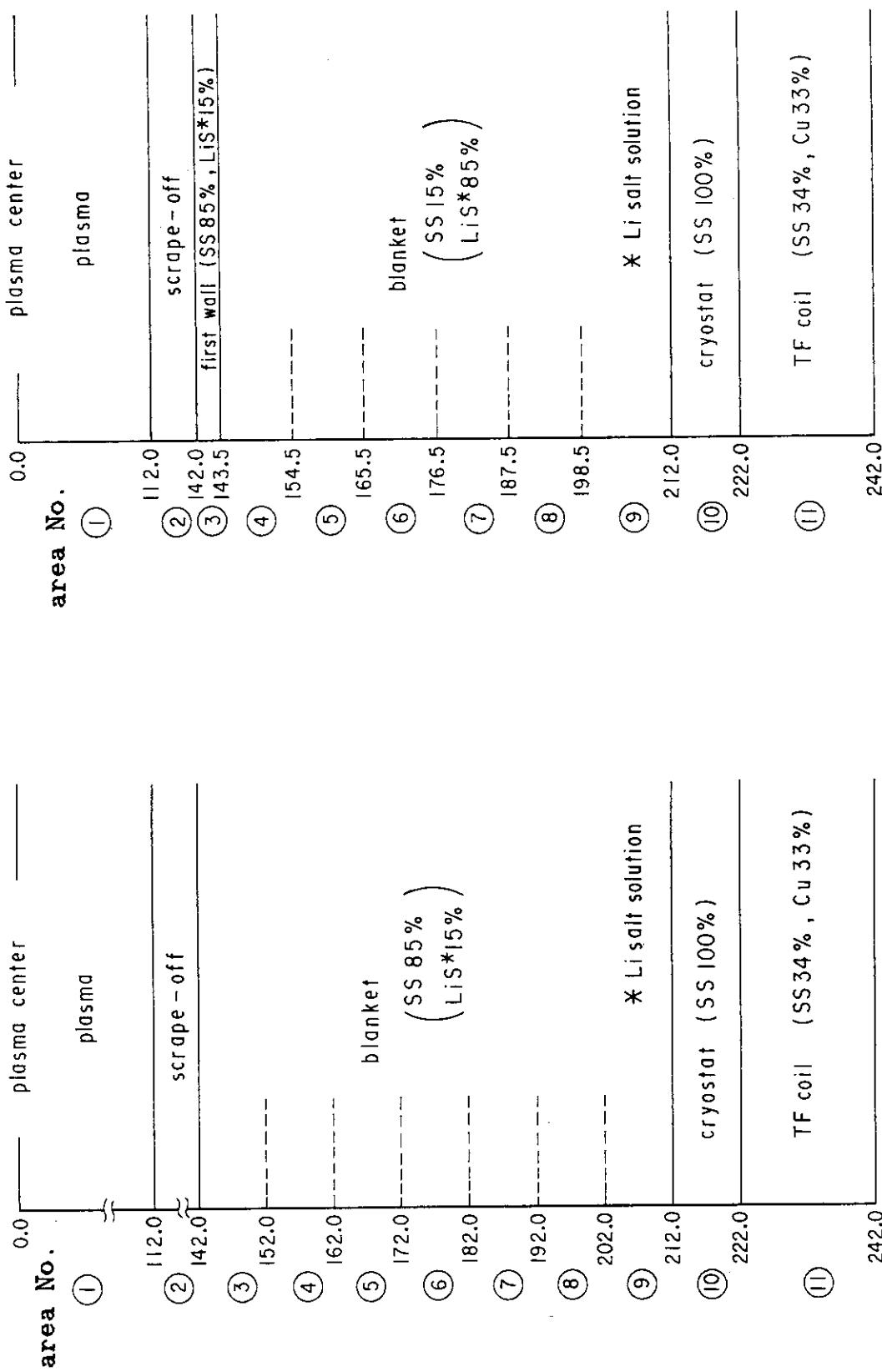


Fig. 2. 1. 2 タンク型プラズマセンター体系

Fig. 2. 1. 1 遮蔽型プラズマセンター体系

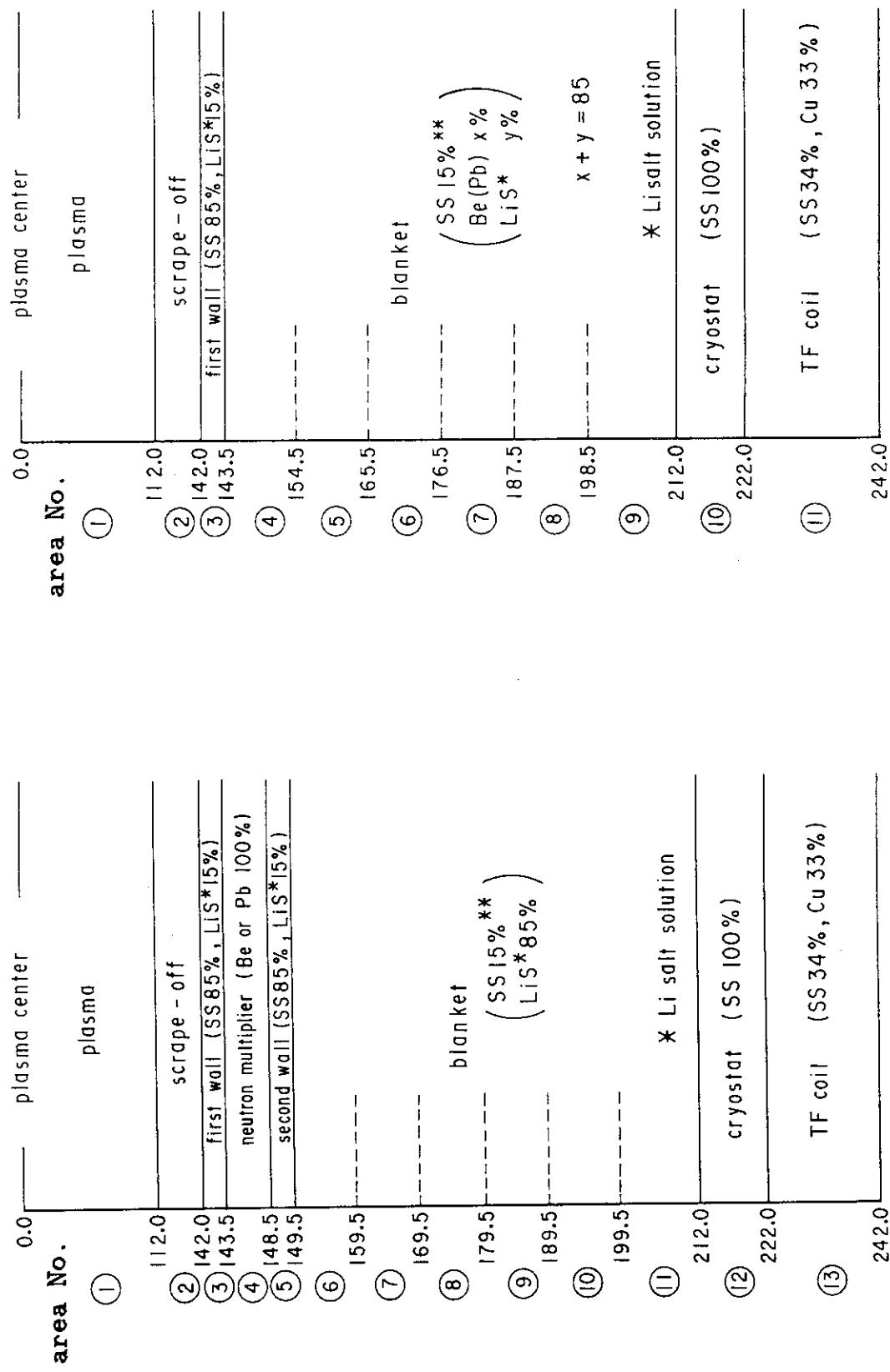


Fig. 2.1.3 前置型プラント体系

Fig. 2.1.4 中性子増倍材均一混合型プラント体系

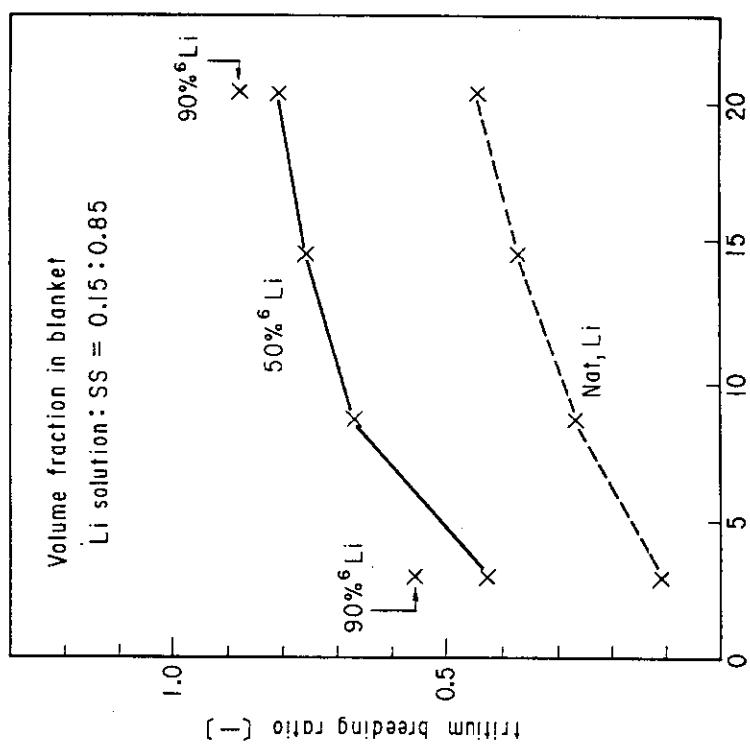
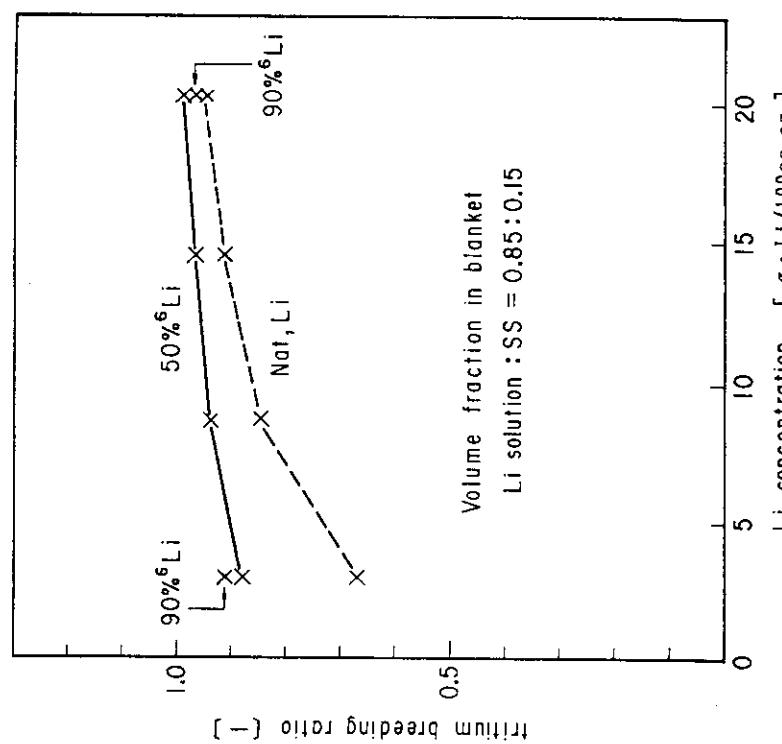


Fig. 2. 1. 5 遮蔽型ブランケットのトリチウム増殖比に及ぼす Li 濃度及び<sup>6</sup>Li 濃縮度の影響

Fig. 2. 1. 6 タンク型ブランケットのトリチウム増殖比に及ぼす Li 濃度及び<sup>6</sup>Li 濃縮度の影響

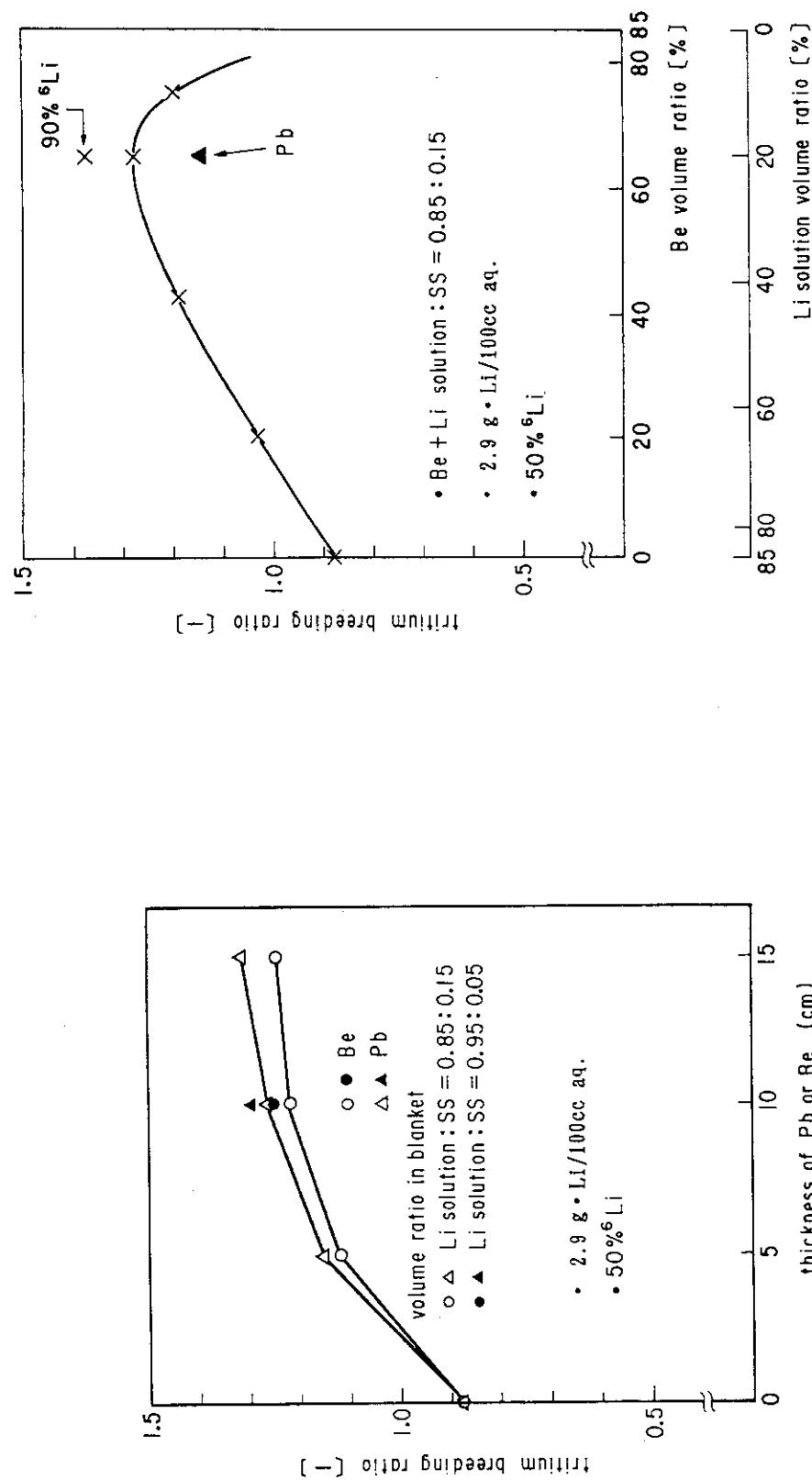


Fig. 2.1.7 中性子増倍材均一混合型ブランケットのトリチウム増殖比に及ぼす中性子増倍材の厚みの影響

Fig. 2.1.8 中性子増倍材均一混合型ブランケットのトリチウム増殖比に及ぼすBe／水溶液混合比の影響

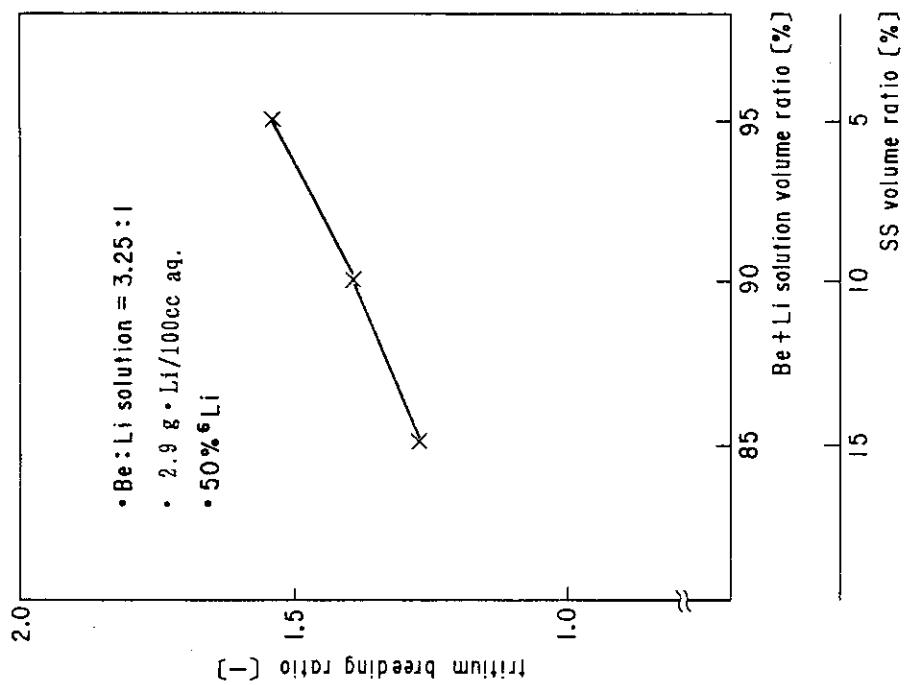


Fig. 2. 1. 9 中性子増倍材均一混合型ブランケットのトリチウム増殖比に及ぼす構造材比率の影響

### 3. 各種リチウム塩の特性

#### 3.1 ブランケット材としての選定基準

リチウム塩は、有機塩系、無機塩系、その他の比較的多くの化合物が知られており、その一般的な物性は詳しく調べられている<sup>(1), (2)</sup>。これらの主要な物性データをTable3.1.1及びTable3.1.2に示す。一方、水溶液ブランケットに適用可能なリチウム塩の選定基準としては、以下の項目が上げられる。

- ① 溶解度：トリチウム増殖性能を高めるためにLi原子密度の大きい水溶液が求められるので、溶解度の大きいリチウム塩を選択する必要がある。
- ② 腐食性：水酸化物(LiOH)、ハロゲン化物(LiCl等)、硝酸塩(LiNO<sub>3</sub>等)、硫酸塩(Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>等)等のリチウム塩水溶液は、一般に腐食性が高い。したがってブランケット及びトリチウム回収システムを構成する構造体、機器及び配管系に対する腐食性が過度に大きいリチウム塩は望ましくない。
- ③ 安定性：チリウム塩水溶液は、ブランケットの放射線環境及び電磁場において放射線分解や電気分解し、H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、ハロゲンガス、SO<sub>2</sub>等使用するリチウム塩に応じた気体が発生することが予想される。したがって、これらの分解作用に対する安定性の高いリチウム塩の選択が重要な課題となる。
- ④ トリチウム回収性：水溶液に生成したトリチウムのインベントリが小さく、回収が容易であることが必要である。
- ⑤ その他：構造材の水素脆化の促進作用のある塩、中性子吸収の大きい不純物を含む塩の使用は望ましくない。

本調査では、入手可能なリチウム塩物性データを用いて各項目ごとに候補リチウム塩の評価、選定を行った。その結果を以下に述べる。

なお、NET計画におけるリチウム塩の評価結果<sup>(3)</sup>をTable3.1.3及びTable3.1.4にまとめた。これらの表から分かるように、ブランケット材として使用可能性があるリチウム塩は、硫酸リチウム、炭酸及び重炭酸リチウム、硝酸及び亜硝酸リチウム、水酸化リチウムである。炭酸及び重炭酸リチウムは、次の述べるように溶解度が小さく増殖性能の面から有利とは言えない化合物であるが、水溶液のpH緩衝作用を期待して選定したようである。

参考文献

- (1) West,R.C. ed. : "Handbook of Chemistry and Physics", 51st ed., The Chemical Rubber Co. (1970)
- (2) Stecher,P.G. ed. : "The Merck Index", 8th ed., Merck & Co., Inc. (1968)
- (3) Bogaerts,W.F., Embrechts,M.J., Waeben,R. : NET Report EUR-FU/XII-80  
/87/75, (1987)

Table 3.1.1 Properties of lithium compounds<sup>(1)</sup>

Formula	Mol. wt.	Crystal system	M. P.	$d_4^{\circ}$
Li <sub>2</sub> O.....	29.8780		>1700	2.013 <sup>14</sup>
LiH.....	7.94670	C.	680	0.820
LiOH.....	23.9467		450	2.54
LiOH.H <sub>2</sub> O.....	41.9621			1.83
LiF.....	25.9390	C.	870	2.295 <sup>21,4</sup> l. 1.789 <sup>10</sup>
LiCl.....	42.3970	C.	613	2.068 <sup>14</sup>
LiClO <sub>4</sub> .....	90.3970		129	
LiClO <sub>4</sub> .0.5H <sub>2</sub> O.....	99.4047		65	
LiClO <sub>4</sub> .....	106.397		236	2.429
LiClO <sub>4</sub> .3H <sub>2</sub> O.....	160.443	H.	95	1.841
LiBr.....	86.8550	C.	547	3.464 <sup>14</sup>
LiBr.2H <sub>2</sub> O.....	122.886		44	
LiBr.3H <sub>2</sub> O.....	140.901		3.5	
LiI.....	133.871		446	4.061 <sup>14</sup> l. 2.827 <sup>17,4</sup>
LiI.3H <sub>2</sub> O.....	187.917		73	
Li <sub>2</sub> S.....	45.9430			1.66
Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	109.943	M.	860	2.221 l. 2.004 <sup>100</sup>
Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O.....	127.958	M.		2.06
Li <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> .2H <sub>2</sub> O.....	210.039	R.		2.158
LiHSO <sub>4</sub> .....	104.012			2.123 <sup>14</sup>
LiNO <sub>3</sub> .H <sub>2</sub> O.....	70.9624			1.615 <sup>9</sup>
LiNO <sub>3</sub> .....	68.9470	Trig.	255	l. 1.77 <sup>14</sup> 2.38
LiNO <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O.....	122.993		d. 29.6	
LiNH <sub>2</sub> .....	22.9624		390	1.178 <sup>17,4</sup>
Li <sub>2</sub> NH.....	28.8937			1.303 <sup>19</sup>
LiBr.NH <sub>3</sub> .....	103.886		97	
LiNH <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	121.043	M. (α) H. (β) M. (γ?)		1.204
LiPO <sub>4</sub> .....	85.963			2.461
Li <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> .....	115.841	R.	837	2.537 <sup>17,4</sup>
Li <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> .12H <sub>2</sub> O.....	332.026	Trig.	100	1.645
LiH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> .....	103.978		>100	2.461
Li <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> .....	159.777			3.07
Li <sub>2</sub> Sb.....	142.587		>950	3.2 <sup>17</sup>
Li <sub>2</sub> C <sub>2</sub> .....	37.8780			1.65 <sup>14</sup>
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .....	73.8780	M.	618	2.111 <sup>17,4</sup> l. 1.765 <sup>100</sup>
Li <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> .....	101.878			2.121 <sup>17,4</sup>
LiCHO <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O.....	69.9621	R.		1.46
LiHC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O—Malate.....	248.070	M.		
LiC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O.....	101.993	R.	70	
Li <sub>2</sub> (CH <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O—Ethane disulfonate.	238.070	M.		1.817
Li <sub>2</sub> C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> O <sub>8</sub> S <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O—Naphthalene 1, 5-disulfonate.....	336.085	M.		1.664
LiNH <sub>2</sub> (d-C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> ).H <sub>2</sub> O.....	191.024	M.		
LiNH <sub>2</sub> (d-C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> ).H <sub>2</sub> O.....	191.024	R.		
Li <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> .....	97.7540			1.12
Li <sub>2</sub> O.SiO <sub>2</sub> .....	89.9380	R.	1201	l. 2.33 <sup>14</sup> 2.52 <sup>14</sup>
Li <sub>2</sub> O.2SiO <sub>2</sub> .....	149.998		1032 d.	2.454 <sup>14</sup>
2Li <sub>2</sub> O.SiO <sub>2</sub> .....	119.816		1256	2.28
Li <sub>2</sub> SIF <sub>6</sub> .2H <sub>2</sub> O.....	191.969	M.		2.3
TiLi(d-C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>2</sub> ).2H <sub>2</sub> O.....	395.401	Tri.		3.144

Table 3.1.2 Properties of lithium compounds (2)

**Lithium.** Li; at. wt 6.939; at. no. 3; valence I. Isotopes: 7 (92.1%); 6 (7.9%). Occurrence in the earth's crust: 0.005%. Discovered in 1817 by Arfvedson; *Ann. Chim. Phys.* [2] 10, 82 (1819). An element of the alkali-metal group; occurs in a number of minerals: spodumene, eucryptite, lepidolite, and triphyllite contain from 3 to 10% lithium and are the most important sources of it. Prepn of the metal by electrochemical processes: Guntz, *Compt. Rend.* 117, 732 (1893); Ruff, Johannsen, *Z. Electrochem.* 12, 186 (1906); by reduction of the oxide with magnesium or aluminum: Warren, *Chem. News* 74, 6 (1896); Hanson, U.S. pat. 2,028,390 (1936).

Silvery-white metal; becomes yellowish on exposure to moist air. The values for the mp vary from 178 to 186°; the most probable value, 180°; Ruff, Johannsen, *Z. Electrochem.* 12, 186 (1906);  $bp_{760}$  1336 ± 5°; Hartman, Schneider, *Z. Anorg. Chem.* 180, 275 (1929). d 0.534. Specific heat 0.9408. Reacts with water forming the hydroxide and hydrogen. Reacts vigorously with nitric acid; dissolves rapidly in dil hydrochloric or sulfuric acid with evolution of hydrogen; slowly attacked by concd sulfuric acid. Soluble in liq ammonia, giving a blue soln. Unaffected by oxygen at room temp; burns with a brilliant white flame when heated in air or in oxygen at 200°, forming the oxide,  $Li_2O$ . Combines with hydrogen at a red heat; combines directly with nitrogen, halogens, or sulfur under the proper conditions. Lithium and its compounds impart a carmine-red color to a bunsen flame. *Keep under mineral oil or other liquid free from oxygen or water.*

USE: In manuf of alloys, especially lithium-hardened bearing metals; as a "getter" in vacuum tubes. In making catalysis for the polyolefin plastics industry, in fuels for aircraft and missiles. Lithium salts are used in porcelain enamels, in air-conditioning, and for making multi-purpose greases. *Human Toxicity:* May injure kidneys, especially if sodium intake is limited.

**Lithium Acetate.** Quilonum,  $C_2H_5LiO_2 \cdot 2H_2O$ ; mol wt 102.02. Anhyd salt 64.68%,  $H_2O$  35.32%,  $Li_2O$  14.64%; acetic acid 58.84%. For the anhyd: C 36.40%, H 4.58%, Li 10.52%, O 48.50%.

White, cryst powder. mp 70°. Freely sol in water or alcohol. Its aq soln is practically neutral.

**Lithium Acetylsalicylate.** Hydroprin; Litmopyrine; Tillytihin,  $CH_3COOC_6H_4COOLi$ ; mol wt 186.08.  $C_9H_7LiO_4$ ; C 58.09%, H 3.79%, Li 3.73%, O 34.39%;  $Li_2O$  8.03%; acetylsalicylic acid 96.81%.

White, slightly hygroscopic powder; dec in moist air. Soluble in 1 part water, 4 parts alcohol.

**Lithium Amide.** Lithamide,  $LiNH_2$ ; mol wt 22.96. H 8.78%, Li 30.23%, N 61.01%. Prepn according to the eq  $Li + NH_3 \rightarrow LiNH_2 + 1/2H_2$ ; Titherley, *J. Chem. Soc.* 65, 517 (1894); Ruff, Geisel, *Ber.* 39, 840 (1906); 44, 505 (1911); Campbell et al., *Proc. Indiana Acad. Sci.* 50, 123 (1940); Schenk in *Handbook of Preparative Inorganic Chemistry*, G. Brauer, Ed., (2nd ed Academic Press, 1963), p 463. *See also Inorg. Syn.* 2, 135.

Cubic crystals,  $d_{4}^{17.5}$  1.178. mp 380-400°. Sublimes in  $NH_3$  current. When heated *in vacuo* to 450°,  $NH_3$  is given off and  $Li_2NH$  forms, which dec about 750-800°. Heat of formation: 42 kcal/g-mole at 18° and 760 mm Hg. Stable in air-tight containers at room temp. Dec by water according to the eq  $LiNH_2 + H_2O \rightarrow LiOH + NH_3$ , slowly when in lumps, faster as the particle size decreases. Insoluble in anhyd ether, benzene, toluene.

USE: In Claisen condensations, alkylation of nitriles and ketones, synthesis of ethynyl compds, acetylenic carbinols. *Human Toxicity:* See Lithium.

**Lithium Benzoate.**  $C_7H_5LiO_2$ ; mol wt 128.05. C 65.65%, H 3.94%, Li 5.42%, O 24.99%;  $Li_2O$  11.67%; benzoic acid 95.37%.

White, cryst powder. One gram dissolves in 3 ml water, 13 ml alcohol, 10 ml boiling alcohol. Solubility in water is increased by sodium benzoate. The aq soln is slightly alkaline to litmus; pH about 8.

USE: Has been used as a lubricant for compressing tablets. *Human Toxicity:* See Lithium.

**Lithium Bitartrate.** Tartarlichine,  $C_4H_7LiO_6 \cdot H_2O$ ; mol wt 174.04.  $C_4H_7LiO_7$ ; anhyd salt 89.65%;  $H_2O$  10.35%;  $Li_2O$  8.58%; tartaric acid 86.22%. For the anhyd: C 30.79%; H 3.22%; Li 4.45%; O 61.53%.

White, cryst powder, sol in water.

**Lithium Borate.** Lithium bi- or tetraborate,  $Li_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$ ; mol wt 239.24. Anhyd salt 65.25%;  $H_2O$  34.75%. For the anhyd: B 25.59%; Li 8.21%; O 66.21%;  $Li_2O$  17.66%;  $B_2O_3$  82.34%.

White, cryst powder. Slightly sol in water; insol in alcohol. USE: In enamels.

**Lithium Borohydride.** Lithium tetrahydroborate,  $LiBH_4$ ; mol wt 21.79. B 49.66%, H 18.50%, Li 31.85%;  $BH_4$  68.16%. Prepd by the action of diborane on ethyllithium; by the action of aluminum borohydride on ethyllithium; Schlesinger, Brown, *J. Am. Chem. Soc.* 62, 3429-35 (1940).

Orthorhombic crystals, dec 279°, d 0.66. Stable under ordinary conditions but dec in moist air. Reacts with hydrogen chloride to form hydrogen, diborane, and lithium chloride; forms lithium boromethoxide and hydrogen with methyl alcohol. Soluble in water at pH above 7. Aq solns dec slowly if the pH is above 7, and rather vigorously when acidified. Soluble in ether, tetrahydrofuran, aliphatic amines.

USE: Strong reducing agent. Used in the reduction of compds contg ketonic, aldehydic, or ester carbonyls and a nitrile group, where reduction of the carbonyl, but not of the nitrile group, is wanted. In the determination of free carboxyl groups in peptides and proteins; after esterification and acetylation, only the ester groups, and none of the peptide bonds are reduced.

**Lithium Bromide.**  $LiBr \cdot H_2O$ ; mol wt 104.87. Anhyd salt 82.82%;  $H_2O$  17.18%; Li 6.62%; Br 76.21%. It usually has less  $H_2O$  and contains 85-90% anhydr  $LiBr$ .

White, very deliquescent, slightly bitter, granular powder. mp 547° when anhydr. Soluble in 0.6 part water, 0.4 part boiling water; freely sol in alcohol, glycol; sol in ether, amyl alcohol. The aq soln is neutral or only slightly alkaline to litmus. *Keep well closed.*

USE: As humectant, in air-conditioning systems.

MED USE: Has been used as hypnotic, sedative. *Human Toxicity:* Large doses may cause CNS depression. Chronic absorption may cause skin eruptions and CNS disturbances due to bromide. May also cause disturbed blood electrolyte balance.

**Lithium Carbonate.** Camcolit; Candamide,  $Li_2CO_3$ ; mol wt 73.89. C 16.25%, Li 18.78%, O 64.96%. Purification: Caley, Elving, *Inorg. Syn.* 1, 1 (1939).

White, light, alkaline powder. d 2.11. mp 618°. One gram dissolves in 78 ml cold, 140 ml boiling water; insol in alcohol; dissolved by dil acids.

USE: In the production of glazes on ceramic and electrical porcelain.

MED USE: Has been used in manic psychosis. *Human Toxicity:* See Lithium.

**Lithium Chloride.**  $LiCl$ ; mol wt 42.40. Li 16.37%; Cl 83.63%. Prepn: Pray, *Inorg. Syn.* 5, 153 (1957).

Deliquescent crystals, granules or cryst powder; sharp saline taste, mp 613° when anhydr; bp 1360°; d 2.07. One gram dissolves in 1.3 ml cold, 0.8 ml boiling water; sol in alcohol, acetone, amyl alcohol, pyridine. The aq soln is neutral or slightly alkaline. *Keep well closed.* LD<sub>50</sub> i.p. in mice: 1.1 g/kg.

USE: Manus mineral waters; in pyrotechnics; soldering aluminum; in refrigerating machines.

MED USE: Has been used in manic psychosis. Formerly as salt substitute in low-sodium diets. *Human Toxicity:* Prolonged absorption may cause disturbed electrolyte balance, impaired renal function, CNS disturbances.

**Lithium Chromate(VI).**  $Li_2CrO_4 \cdot 2H_2O$ ; mol wt 165.92. Anhyd salt 78.28%;  $H_2O$  21.72%. For the anhyd: Cr 40.04%, Li 10.69%, O 49.27%;  $CrO_4$  77.00%;  $Li_2O$  23.00%. Yellow, deliquescent, cryst powder. Becomes anhydr at 74.6°. Very sol in water. The anhydr salt is appreciably sol in methanol and ethanol. Eutectic with water below -60°. *Keep well closed.*

USE: Corrosion inhibitor for water-cooled atomic reactors. Soln as low temp heat transfer medium.

**Lithium Citrate.**  $C_6H_5LiO_7 \cdot 4H_2O$ ; mol wt 281.98. Anhyd salt 74.44%;  $H_2O$  25.56%;  $Li_2O$  15.89%; anhydr citric acid 68.13%. For the anhyd: C 34.33%; H 2.40%; Li 9.92%; O 53.33%.

White granules or cryst powder; feebly alkaline taste; deliquesces on exposure to moist air; loses all of its water at 105°. Soluble in 1.5 parts water, slightly in alcohol. The aq soln is slightly alkaline to litmus. pH about 8. *Keep well closed.*

USE: In soft drinks.

MED USE: Has been used in manic psychosis. *Human Toxicity:* See Lithium.

**Lithium Dichromate(VI).** Lithium bichromate,  $Li_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$ ; mol wt 265.93. Anhyd salt 86.45%;  $H_2O$  13.55%; Cr 39.12%; O 42.12%; Li 5.22%;  $Li_2O$  11.24%;  $CrO_3$  75.21%.

Yellowish-red, hygroscopic, cryst powder. Soluble in less than 1 part water. *Keep well closed.*

Table 3.1.2 (Continued)

**Lithium Urate.** *Uric acid lithium derivative;* lithium blurate or acid urate.  $\text{LiHC}_5\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_3$ ; mol wt 174.05. C 34.50%, H 1.74%, Li 3.99%, N 32.19%, O 27.58%, Li<sub>2</sub>O 8.58%, uric acid 96.59%.

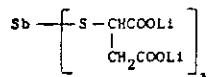
White powder. Soluble in 380 ml cold water, 39 ml boiling water; slightly sol in alcohol.

**Aluminum Lithium Hydride.** Lithium aluminum hydride; lithium aluminohydride; lithium alanate; lithium tetrahydroaluminate.  $\text{LiAlH}_4$ ; mol wt 37.94. Al 71.11%, H 10.62%, Li 18.29%, AlH<sub>4</sub> 81.71%. Prep'd by treating lithium hydride with an ether soln of  $\text{AlCl}_3$ : Finthorpe, Bond, Schlesinger, *J. Am. Chem. Soc.* 69, 1199-1203 (1947).

Microcrystalline powder. Stable in dry air at room temperature, decomp above 125°, slowly loses hydrogen at 120°, decomp in moist air, may ignite on grinding in air. 30 parts dissolve in 100 parts of ether, 13 parts in 100 parts tetrahydrofuran, 10 parts in 100 parts dimethyl Cellosolve, 2 parts in 100 parts dibutyl ether, 0.1 part in 100 parts dioxane. Reacts rapidly with water and alcohols; reduces aldehydes, ketones, acid chlorides and esters to alcohols; nitriles to amines; aromatic nitro compounds to azo compounds. Does not attack olefinic double bonds unless they are conjugated with a phenyl group and a carbonyl or nitrile group.

**USE:** Reducing agent; in preparation of other hydrides.

**Anthiolimine.** *Mercaptosuccinic acid antimonate(III) hexolithium salt;* mercaptosuccinic acid S-antimony derivative lithium salt; lithium antimoniothiomalate; lithium antimony thiomalate; Anthiomaline.  $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{Li}_6\text{O}_{12}\text{S}_2\text{Sb}$ ; mol wt 604.78. C 23.83%, H 1.50%, Li 6.88%, O 31.75%, S 15.91%, Sb 20.13%. Prep'n: Dulepine, Guillot, U.S. pat. 2,060,181 (1937 to Rhône-Poulenc).



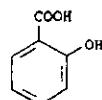
Enneahydrate,  $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{Li}_6\text{O}_{12}\text{S}_2\text{Sb} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , hygroscopic powder. Very soluble in water; very slightly soluble in alc, ether.

Supplied in form of a 16% soln, each ml of which contains 0.06 g of the salt = about 0.01 g antimony.

**MED USE:** Has been used for trypanosomiasis, filariasis, lymphogranuloma, schistosomiasis. **Dose:** i.m. 0.5 to 5 ml of 16% soln. **Side Effects:** Myalgia, weakness may occur.

**VET USE:** Has been suggested as an anthelmintic.

**Salicylic Acid.** *o-Hydroxybenzoic acid.*  $\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3$ ; mol wt 138.12. C 60.87%, H 4.38%, O 34.75%. Occurs in the form of esters in several plants, notably in wintergreen leaves and the bark of sweet birch. Made synthetically by heating sodium phenolate with carbon dioxide under pressure. Large scale process details: Faith et al., *Industrial Chemicals*, (3rd ed, Wiley, New York, 1965), pp 652-655. Novel method by microbial oxidation of naphthalene: Zajic, Dunlap, U.S. pat. 3,274,074 (1966 to Kerr-McGee).



Acicular crystals, or cryst powder. Gradually discolors in sunlight. d 1.44; mp 157-159°; bp<sub>20</sub> about 211°. Sublimes at 76°; when rapidly heated at ordinary atm pressure it dec into phenol and CO<sub>2</sub>. One gram dissolves in 460 ml water, 15 ml boiling water, 2.7 ml alcohol, 3 ml acetone, 42 ml chloroform, 3 ml ether, 135 ml benzene, 52 ml oil turpentine, about 60 ml glycerol, about 80 ml fats or oils; solv in water increased by sodium phosphate, borax, alkali acetates or citrates. pH of said aq soln 2.4. **Keep protected from light.** LD orally in rabbits: 1.3 g/kg.

Salicylic acid or its salts are colored reddish even by merest traces of ferric salts. **Incompat:** Iron salts, spirit nitrous ether, lead acetate, iodine.

Lithium salt,  $\text{C}_7\text{H}_5\text{LiO}_3$ , *lithium salicylate*. White or grayish-white, odorless, sweetish powder. Deliquesces in moist air. Very sol in water, alcohol; the aq soln is slightly acid to litmus. **Keep well closed and protected from light.**

Silver salt,  $\text{C}_7\text{H}_5\text{AgO}_3$ , *silver salicylate*. White to reddish-white crystals. Slightly sol in water, alcohol. **Protect from light.**

**USE:** As preservative of food products, but its use for this purpose is forbidden in some countries; manuf methyl salicylate, acetylsalicylic acid and other salicylates, dyes; as reagent in analytical chemistry.

**MED USE:** Topical keratolytic. Has been used extern. as antimicrobial. **Dose:** Topically 2-20% concn in lotions, ointments, powders, plasters. **Human Toxicity:** Absorption of large amounts can cause vomiting, abdominal pain, increased respiration, acidosis, mental disturbances. May cause skin rashes in sensitive individuals.

**VET USE:** Ointments or alcoholic solns contg 10-30% salicylic acid are used in favus and ringworm infections. Also employed in thrush and in other conditions where horny material must be softened and removed. Internally given in gastric tympany of horses. **Dose:** horses: 15-22 g.

Table 3.1.2 (continued)

**Lithium Fluoride.** LiF; mol wt 25.94. Li 26.75%, F 73.25%. Prepd from LiOH and HF or by dissolving  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  in excess HF, evaporating to dryness, and heating to red heat: v. Wartenberg, Schulz, Z. Elektrochem 27, 568 (1921).

Cubic crystals (NaCl lattice) or white fluffy powder.  $d_{\text{solid}}^{20}$  2.640;  $d_{\text{liq}}^{20}$  1.699. mp 842°. bp 1676°. Volatilizes at 1100–1200°. Sparingly sol in water: 0.113 g/100 ml at 25°, also reported as 0.27 g/100 ml at 18°. Soluble in acids. With hydrofluoric acid it forms lithium bisfluoride,  $\text{LiHF}_2$ . With lithium hydroxide it forms a double salt  $\text{LiF} \cdot \text{LiOH}$ , mp 462°. LD orally in guinea pigs: 200 mg/kg.

use: As flux for soldering and welding aluminum, in the manuf of vitreous enamels and glazes. Lithium fluoride prisms are used in infra-red spectrophotometers.

**Lithium Formate.**  $\text{HCOOLi} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ; mol wt 69.97. Anhydr salt: 74.25%;  $\text{H}_2\text{O}$  25.75%; Li 9.92%;  $\text{Li}_2\text{O}$  21.35%; formic acid 65.78%. For the anhydr: C 23.11%, H 1.94%, Li 13.36%; O 61.59%;  $\text{Li}_2\text{O}$  28.75%.

Colorless or white crystals. d 1.46. Soluble in 3 parts water. The aq soln is practically neutral.

**Lithium Hydride.** LiH; mol wt 7.95. Li 87.30%, H 12.70%. Prepd by the direct combination of hydrogen and lithium: Gibb, Trans. Electrochem. Soc. 93, 198–211 (1948).

Cubic crystals, darkens rapidly on exposure to light, the commercial product is usually gray. mp 680°, d 0.820. No solvent known. Rapidly dec in water to form lithium hydroxide and hydrogen. Reacts with the lower alcohols, carboxylic acids, chlorine, and ammonia at 400° to liberate hydrogen.

use: Reducing agent; condensing agent with ketones and acid esters; desiccant; in hydrogen generators; 1 g in water liberates approx 2.8 l of hydrogen at STP.

**Lithium Hydroxide.** Lithium hydrate,  $\text{LiOH}$ ; mol wt 23.95. H 4.21%, Li 28.98%; O 66.80%;  $\text{Li}_2\text{O}$  62.37%. Prepn: Bravo, Inorg. Syn. 7, 1 (1963); Cohen, ibid. 5, 3 (1957); Barnes, J. Chem. Soc. 1931, 2605.

Granular, free-flowing powder; acrid, strongly alkaline. Readily absorbs  $\text{CO}_2$  and water from air. d 2.54. mp 450°. Soluble in water, slightly sol in alcohol. *Keep tightly closed.*

Hydrate,  $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ , small monoclinic crystals.  $d_{\text{liq}}^{20}$  1.51. Heat of formation –188.9 kcal/mol at 25°. Heat of soln –0.87 kcal/mol at 25°. Solubility in water (w/w) at 0° = 10.7%, at 20° = 10.9%, at 100° = 14.8%. Slightly soluble in alcohol. pH of a 1.0N soln about 14.

use: In photographic developers; in alkaline storage batteries; in prepns of other lithium salts where use of carbonate is not practical; as catalyst in the production of alkyl resins, in esterifications; in the production of lithium soaps, greases, sulfonates. *Human Toxicity:* Strongly alkaline and hence caustic. Very irritating to skin. Systemic toxicity similar to other lithium compds. See Lithium.

**Lithium Iodate.**  $\text{LiIO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; mol wt 190.87. Anhydr salt 95.28%;  $\text{H}_2\text{O}$  4.72%; Li 3.64%;  $\text{Li}_2\text{O}$  7.83%; I 66.49%;  $\text{I}_2\text{O}_5$  87.45%.

Colorless, deliquescent crystals. Soluble in 1.5 parts water; insol in alcohol. *Keep well closed.*

**Lithium Iodide.**  $\text{LiI} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; mol wt 187.91. Anhydr salt 71.24%;  $\text{H}_2\text{O}$  28.76%; Li 3.69%; I 67.54%.

White, deliquescent granules or fused masses; becomes yellow on exposure to air, due to liberation of iodine. mp 73°; mp 446° when anhydr. Soluble in about 0.5 part water or alcohol, freely in amyl alcohol or acetone. The aq soln is neutral or slightly alkaline. *Keep tightly closed and protected from light.*

use: In photography.

**Lithium Nitrate.**  $\text{LiNO}_3$ ; mol wt 68.95. Li 10.07%; N 20.31%;  $\text{Li}_2\text{O}$  21.67%; O 69.62%;  $\text{NO}_3$  89.93%;  $\text{N}_2\text{O}_5$  78.33%.

Colorless, deliquescent granules. d 2.38. mp about 255°. Soluble in about 2 parts water; sol in alcohol. The aq soln is neutral. *Keep well closed.*

**Lithium Oxalate.**  $\text{Li}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ; mol wt 101.88. C 23.58%; Li 13.62%; O 62.81%;  $\text{Li}_2\text{O}$  29.33%; anhydr oxalic acid 88.36%.

White crystals. d 2.12. Soluble in 15 parts water.

**Lithium Oxide.**  $\text{Li}_2\text{O}$ ; mol wt 29.88. Li 46.45%; O 53.55%. Prepd from lithium peroxide: Cohen, Inorg. Syn.

5, 5 (1957); from lithium hydroxide: Bravo, ibid. 7, 3 (1963).

Finely divided powder or crusty material.  $d_{\text{liq}}^{20}$  2.013; mp >1700°. Readily absorbs carbon dioxide and water from the atm. At elevated temp attacks glass, silica, many metals.

*Human Toxicity:* See Lithium.

**Lithium Perchlorate.**  $\text{LiClO}_4$ ; mol wt 106.40. Li 6.52%; Cl 33.33%; O 60.15%.

Small crystals.  $d_{\text{liq}}^{20}$  2.43. mp 236°. Decompr starts at about 400° and becomes rapid at 430° yielding lithium chloride and oxygen. Heat of formation: –99.94 kcal/mol at 25°. Solubility in water (w/w) at 0° = 29.9%; at 25° = 37.5%; at 100° = 71.5%. Appreciably sol in alcohol, acetone, ether, ethyl acetate.

use: Oxidizing agent. *Human Toxicity:* May be irritating on contact with skin, mucous membranes. Systemic toxicity similar to other lithium compds. See Lithium.

**Lithium Phosphate.**  $\text{Li}_3\text{PO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; mol wt 124.81. Anhydr salt 92.78%;  $\text{H}_2\text{O}$  7.22%. For the anhydr: Li 17.98%; O 55.27%; P 26.75%;  $\text{Li}_2\text{O}$  38.70%;  $\text{P}_2\text{O}_5$  61.29%;  $\text{PO}_4$  82.02%.

White, cryst powder. Soluble in about 2500 parts water; sol in dil acids.

**Lithium Rubidium Tetracyanoplatoinate(II).** Platinous lithium rubidium cyanide,  $\text{LiRbPt}(\text{CN})_4$ ; mol wt 391.58. C 12.26%; Li 1.77%; N 14.31%; Pt 49.84%; Rb 21.82%. (Contains a variable quantity of water.)

Greenish-yellow, cryst needles. Soluble in water. More strongly fluorescent in x-rays than platinum barium cyanide; hence used instead of the latter in fluoroscopy.

**Lithium Selenate.**  $\text{LiSeO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ; mol wt 167.92. Li 4.13%; Se 47.02%;  $\text{SeO}_4$  75.61%. Prepd by roasting lithium selenite in air or by roasting lithium carbonate with selenium or selenium oxide: Lenher, Wechter, J. Am. Chem. Soc. 47, 1522 (1925).

Monoclinic crystals. *Poisonous!* d 2.565. Stable in air. Readily sol in water.

**Lithium Selenite.**  $\text{LiSeO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ; mol wt 151.91. Li 4.57%; Se 51.98%;  $\text{SeO}_3$  73.04%. Prepd from a soln of selenious acid in lithium hydroxide at 60°: Nilson, Bull. Soc. Chim. [2] 21, 253 (1874); ibid. [2] 23, 262 (1875).

Acicular crystals. Hygroscopic. More sol in cold water than in hot water.

**Lithium Silicate.** Lithium metasilicate,  $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ ; mol wt 89.97. Li 15.43%; Si 31.22%; O 53.35%. Prepd by fusing  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  with  $\text{SiO}_2$ : Schwarz, Sturm, Ber. 47, 1737 (1914).

Orthorhombic needles.  $d_{\text{liq}}^{20}$  2.52. mp 1201°. Heat of formation (solid): –434.9 kcal/mol. Heat of formation (liq) –374.6 kcal/mol. Latent heat of fusion (1177°) = 7.24 kcal/mol, also reported as –80.2 cal/g. Insoluble in cold water, dec by boiling water, dilute hydrochloric acid.

use: To calibrate thermoelements.

**Lithium Sulfate.**  $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ; mol wt 127.96. Anhydr salt 85.92%;  $\text{H}_2\text{O}$  14.08%; Li 10.85%;  $\text{Li}_2\text{O}$  23.35%; S 25.06%;  $\text{SO}_4$  75.07%;  $\text{H}_2\text{SO}_4$  76.65%.

Colorless crystals; loses the water at 130°. d 2.06. Soluble in 2.6 parts water; almost insol in alcohol. The aq soln is neutral.

**Lithium Tartrate.**  $\text{C}_4\text{H}_4\text{Li}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ; mol wt 179.97. Anhydr salt 89.99%;  $\text{H}_2\text{O}$  10.01%;  $\text{Li}_2\text{O}$  16.60%; tartaric acid 83.39%. For the anhydr: C 29.66%; H 2.49%; Li 8.59%; O 59.28%.

White, cryst powder. Soluble in water. The aq soln is neutral or slightly alkaline to litmus.

**Lithium Tetracyanoplatoinate(II).** Platinous lithium cyanide; lithium platinocyanide,  $\text{Li}_2\text{Pt}(\text{CN})_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ; mol wt 403.12. Anhydr salt 77.66%;  $\text{H}_2\text{O}$  22.34%; C 11.92%; Li 3.44%; N 13.90%; Pt 48.41%.

Greenish-yellow crystals. Slightly sol in water.

use: In x-ray photography.

**Lithium Thiocyanate.** Lithium sulfocyanate,  $\text{LiSCN}$ ; mol wt 65.02. C 18.47%; Li 10.67%; N 21.54%; SCN 89.33%; S 49.31%; CN 40.01%.

White, deliquescent crystals. Freely sol in water or alcohol. *Keep well closed.*

Table 3.1.3 Evaluation of Li-salts for aqueous solution blanket<sup>(3)</sup>

Li-salts	Remarks	Li-salts	Remarks
acetate	d	iodate	c
meta-aluminate	s	iodide	c
aluminium hydride	d	laurate	s/d
amide	d	permanganate	(o)
antimonide	d	molybdate	(o)
ortho-arsenate	o	myristate	s/d
azide	o	nitrate	
benzoate	o	nitride	o
metaborate	o	nitrite	
pentaborate	o	oxalate	(o)
tetraborate	o	oxide	d
borohydrate	d	palmitate	s/d
bromide	c	metaphosphate	s
carbide	d	orthophosphate	s
carbonate		potassium sulphate	o
bicarbonate		potassium di-tartrate	o
chlorate	c	salicylate	d
perchlorate	c	selinide	d
chloride	c	metasilicate	s
chloroplatinate	c	orthosilicate	s
dichromate		silicide	d
citrate	d	sodium fluoaluminate	s
fluoride	c	stearate	s/d
fluosilicate	(o)	sulphate	
fluosulfonate	(o)	sulphate, hydrogen	d
formate	d	sulfide	c
gallium hydride	d	tartrate	d
gallium nitride	d	thallium di-tartrate	d
metagermanate	s	thiocyanate	o
hydride	d	dithionate	d
hydroxide		tungstate	(o)

Rejected : s : solubility reasons

c : corrosion

d : decomposes

o : dother

Table 3.1.4 Candidate Li-salts for aqueous solution blanket<sup>(3)</sup>

Li-salts	Molecular weight	Li-content (wt%)
Li-sulphate	109.94	12.62
Li-carbonate	73.89	18.78
Li-bicarbonate	67.96	10.21
Li-nitrate	68.94	10.06
Li-nitrite	52.94	13.11
Li-hydroxide	23.95	28.95

### 3.2 リチウム塩の溶解度

トリチウム増殖性能の高い水溶液ブランケットを実現するためには、水に対する溶解度と Li 原子濃度の大きいリチウム塩を使用することが有利となる。各種リチウム塩の溶解度データは、Table3.2.1～Table3.2.3に示すように高々 100 °C の範囲までであり<sup>(1)～(4)</sup>、発電を目的とする高温ブランケット（運転温度 250～300 °C）の設計に必要なデータはほとんど知られていない。

ここでは、0～約 100 °C の範囲におけるデータを用いた NET の候補リチウム塩の特性<sup>(4)</sup> を比較検討する。各リチウム塩の溶解度の温度依存性 (Fig.3.2.1) に着目すると、硝酸及び亜硝酸リチウムの溶解度は、他のリチウム塩の溶解度よりも約 2～3 倍大きくしかも温度とともに増加することが分かる。硫酸リチウム及び炭酸リチウムの溶解度は、温度に余り依存しない傾向が見られる。一方、溶液中の Li 原子濃度 (Fig.3.2.2) に着目すると、40 °C 以上では、水酸化リチウムが硫酸リチウムを上回ること分かる。ちなみに、水酸化リチウムの高温での溶解度として 100 °C 及び 300 °C でそれぞれ 17.5 及び 14.2 wt % であり、200 °C で最大値をとるとする報告もあるようである。

以上溶解度の観点から、硝酸リチウム、亜硝酸リチウム及び水酸化リチウムがブランケット材としての可能性があると言える。

### 参考文献

- (1) 日本化学会編：“化学便覧基礎編”，改訂 2 版 丸善 (1975)
- (2) West,R.C. ed. : “Handbook of Chemistry and Physics”, 51st ed., The Chemical Rubber Co. (1970)
- (3) Bogaerts,W.F., Embrechts,M.J., Waeben,R. : NET Report EUR - FU/XII - 80 /87/75, (1987)

Table 3.2.1 Solubility of lithium compounds<sup>(1)</sup>

化 合 物	Wt %	溫 度 °C	(g/l)										
			0	10	20	25	30	40	50	60	70	80	100
$\text{Li}_2\text{BeF}_4$	—(α)	—	.....	.....	12.46	.....	14.44	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	—(β)	—	.....	.....	.....	.....	.....	57.76	55.38	53.50	51.53	46.78	42.03
$\text{LiBr}$	3 $\text{H}_2\text{O}$	■	59.2 [4]	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	2 $\text{H}_2\text{O}$	■	.....	62.4	63.9	64.8	66.7 [34]	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	1 $\text{H}_2\text{O}$	■	.....	.....	.....	.....	.....	67.2	67.9	69.1	.....	71.0	72.7
$\text{LiBfO}_3$	1 $\text{H}_2\text{O}$	■	61.23	63.3 <sup>15</sup>	64.4	65.4	66.5	69.0	72.4 [52]	.....	.....	.....	.....
	—	■	.....	.....	.....	.....	.....	72.72 <sup>16</sup>	73.86 <sup>16</sup>	74.5	75.81	78.0	.....
$\text{Li}_2\text{CO}_3$	—	■	1.52	1.41	1.31	1.28	1.24	1.16	1.07	1.00	.....	0.84	0.71
$\text{LiCl}$	2 $\text{H}_2\text{O}$	■	40.9	42.7	45.4 [18.3]	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	1 $\text{H}_2\text{O}$	■	.....	.....	45.85	46.3	47.3	48.3	49.6	51.1	52.8 [56.1]	56.2	56.2
$\text{LiClO}_4$	3 $\text{H}_2\text{O}$	■	53.2	62.6 [8 mp]	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	2 $\text{H}_2\text{O}$	■	29.90	32.88	35.95	37.48	38.87	41.97	.....	48.6	.....	55.8 [93.1 mp]	66.3
	1 $\text{H}_2\text{O}$	■	.....	.....	0.120	0.125 <sup>18</sup>	0.133	0.135 <sup>19</sup>	.....	.....	.....	70.3 [92.5]	71.4
$\text{LiF}$	—	■	.....	.....	0.120	0.125 <sup>18</sup>	0.133	0.135 <sup>19</sup>	.....	.....	.....	.....	.....
$\text{Li}_2\text{HPO}_4$	1 $\text{H}_2\text{O}$	■	9.07	.....	.....	7.47	7.07	6.64	6.13	5.71	.....	4.93	4.16
$\text{LiI}$	3 $\text{H}_2\text{O}$	■	60.2	61.1	62.2	62.6	63.1	64.2	65.2	66.9	69.7 [75 mp]	72.5	.....
$\text{LiNO}_3$	—	■	.....	47.15 <sup>20</sup>	45.83 <sup>21</sup>	45.33 <sup>22</sup>	44.85 <sup>23</sup>	44.12 <sup>24</sup>	43.53 <sup>25</sup>	43.35 <sup>26</sup>	42.90	42.78	42.92
$\text{LiNO}_2$	1 $\text{H}_2\text{O}$	■	43.8	.....	50.4	.....	55.9 <sup>27</sup>	.....	63.0 [50.8]	.....	.....	.....	.....
$\text{LiNO}_3$	3 $\text{H}_2\text{O}$	■	34.6	37.8	42.3	45.8 [29 mp]	56.1	62.0	63.0	64.2	65.2	66.4	67.3 [68.0]
$\text{LiNH}_4\text{O}_2$	—	■ $\times 10^2$	3.4	.....	.....	4.2	.....	.....	6.4	.....	8.9 <sup>28</sup>	.....	10.9
$\text{LiNCS}$	2 $\text{H}_2\text{O}$	■	.....	.....	53.2	54.5	56.7	58.1[34]	.....	.....	.....	.....	.....
	—	■	.....	.....	.....	.....	58.8 <sup>29</sup>	60.4	.....	.....	.....	.....	.....
$\text{LiOH}$	1 $\text{H}_2\text{O}$	■	10.64	10.80	10.99	11.14	11.27	11.68	12.12	12.76	.....	11.21	10.05
$\text{Li}_2\text{P}(\text{CN})_4$	2 $\text{H}_2\text{O}$	■	52.38	55.36	57.98	59.18	60.16	61.98	63.50	65.16	66.78	68.45	70.33 <sup>30</sup>
$\text{Li}_2\text{SO}_4$	1 $\text{H}_2\text{O}$	■	26.50	26.15	25.81	25.64	25.46	25.10	24.80	24.50	24.23	23.98	23.60
$\text{Li}_2\text{SrO}_3$	3 $\text{H}_2\text{O}$	■	19.99	.....	.....	16.76	.....	.....	14.57 <sup>31</sup>	12.75	.....	.....	9.05
$\text{Li}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$	2 $\text{H}_2\text{O}$	■	.....	.....	.....	.....	2.70 <sup>32</sup>	2.62	.....	3.35 <sup>33</sup>	.....	3.89	.....
	—	■	.....	.....	.....	.....	4.08 <sup>34</sup>	4.22	.....	4.76 <sup>34</sup>	.....	5.67	.....
$\text{LiTaO}_3$	—	■ $\times 10^2$	1.21	.....	.....	2.47	.....	.....	5.40	.....	8.97 <sup>35</sup>	.....	12.00
$\text{LiVO}_4$	9 $\text{H}_2\text{O}$	■	2.4	3.5	4.5	5.1	5.7	6.3[35]	.....	4.2	2.8	2.6	.....
	1 $\text{H}_2\text{O}$	■	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Table 3.2.2 Properties of lithium compounds (2)

No.	Name	Synonyms and Formulas	Mol. wt.	Crystalline form, properties and index of refraction	Density or spec. gravity	Melting point, °C	Boiling point, °C	Solubility, in grams per 100 cc		
								Cold water	Hot water	Other solvents
I185	Lithium hydride.....	LiH.....	7.95	wh cr.....	0.82	680	d 924	.....	.....	v al s al
I186	hydroxide.....	LiOH.....	23.95	wh tetr. 1.464, 1.452	1.40	450	.....	12.8*	17.51*	s al s al
I187	hydroxide, mono-hydrate	LiOH.H <sub>2</sub> O.....	41.90	wh monocl. 1.460, 1.524	1.51	.....	.....	22.3*	26.8*	s al s al; i eth
I188	iodate.....	LiIO <sub>3</sub> .....	181.84	wh, hex, hygr....	4.502*	.....	.....	80.3*	.....	i al
I189	iodine.....	LiI.....	133.84	wh, cub. 1.055 ± 0.003	3.494 ± 0.015	450	1180 ± 10	163*	433*	250.8* al; 42.0* acet 343.4* MeOH; v a NHOH
I190	iodide, trihydrate	LiI.3H <sub>2</sub> O.....	187.89	col-yellow, hex, hygr	3.48	73 - H <sub>2</sub> O	- 2H <sub>2</sub> O, 80 - H <sub>2</sub> O, 300	151*	201.2*	s abn, acet
I191	laurate.....	LiC <sub>12</sub> H <sub>25</sub> O <sub>2</sub> .....	206.25	wh powd.....	.....	229.2-229.8	.....	0.154**	0.178*	0.322* al; 0.0084* eth; 0.240* acet d alk
I192	permanganate.....	LiMnO <sub>4</sub> .3H <sub>2</sub> O.....	179.92	cub.....	2.06	d 190	.....	71.43*	.....	.....
I193	molybdate.....	Li <sub>2</sub> MoO <sub>6</sub> .....	173.82	wh trig, hygr.....	2.00	703	.....	v a	.....	.....
I194	myristate.....	LiC <sub>14</sub> H <sub>29</sub> O <sub>2</sub> .....	234.31	.....	.....	223.0-224.2	.....	0.0271*	0.062*	0.0104* eth; 0.331* acet; 0.153* al
I195	nitrate.....	LiNO <sub>3</sub> .....	68.94	wh, trig. 1.734, 1.735	2.38	264	d 600	89.87*	234*	s NHOH, al; 37.15 pyridine
I196	nitrate, trihydrate	LiNO <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O.....	122.99	col need.....	.....	- 2H <sub>2</sub> O, 29.9	- 3H <sub>2</sub> O, 61.1	34.8*	57.48**	s al, MeOH, acet
I197	nitride.....	Li <sub>3</sub> N.....	34.82	red-brn amorph, or blk-gray cr, cub	.....	tr 840-850 (in N <sub>2</sub> )	.....	.....	.....	.....
I198	nitrite.....	LiNO <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O.....	70.96	col flat need.....	1.015*	>100	d	125*	459*	v s abn al
I199	oxalate.....	LiC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> .....	101.90	col, rhomb, 1.465, 1.53, 1.090	2.121**	d	84*	.....	.....	i al, eth
I200	oxalate, acid.....	LiHC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O.....	113.99	.....	.....	d	84*	.....	.....	.....
I201	oxide.....	Li <sub>2</sub> O.....	29.88	wh cr, cub, ab	2.013**	>1700	1200**	6.67* d	10.02**	.....
I202	palmitate.....	LiC <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub> .....	282.36	wh powd.....	.....	224.5	.....	0.01*	0.015*	0.347* acet; 0.077* al; 0.0034* eth
I203	metaphosphate.....	LiPO <sub>3</sub> .....	85.91	col pl.....	2.401	red heat	.....	i	i	s a
I204	orthophosphate.....	LiPO <sub>4</sub> .....	115.79	col, rhomb.....	2.537**	837	.....	0.0391*	.....	s a, NH <sub>4</sub> OH; i acet
I205	orthophosphate.....	LiPO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O.....	124.80	wh cr powd.....	2.41	- 1H <sub>2</sub> O, 100	.....	0.04*	.....	s a
I206	phosphate, di-H.....	LiH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> .....	103.93	col cr, hygr.....	2.461	>100	.....	.....	.....	.....
I207	potassium sulfate.....	LiKSO <sub>4</sub> .....	142.10	col, hex; mp 1.4723, 1.4717	2.393*	.....	.....	s	s	.....
I208	potassium di-tartrate	LiKC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> .H <sub>2</sub> O.....	212.13	col, monocl, δ 1.523 (red)	1.610	.....	.....	s	.....	.....
I209	salicylate.....	LiC <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> .....	144.06	wh, powd, deliq.....	.....	d	133.3	.....	.....	50 al
I210	selenide.....	Li <sub>2</sub> Se.9H <sub>2</sub> O.....	254.98	col, rhomb, deliq.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
I211	metasilicate.....	Li <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> .....	89.96	col, rhomb; α 1.584, γ 1.004	2.52*	1204	.....	i	s d	s dil HCl
I212	orthosilicate.....	Li <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> .....	119.84	col, rhomb; α 1.594, γ 1.614	2.392*	1236	.....	i	i	d s
I213	silicide.....	Li <sub>2</sub> Si.....	97.81	bi cr, hygr.....	ca. 1.12	d 600 (vac)	.....	d	.....	d s; i NH <sub>3</sub> ; turp
I214	sodium fluor aluminate	Li <sub>2</sub> Na <sub>3</sub> (AlF <sub>6</sub> ) <sub>2</sub> .....	371.73	cub cr. 1.3395,	2.774	710	.....	0.074*	.....	.....
I215	stearate.....	LiC <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub> .....	290.41	wh cr.....	.....	220.5-221.5	.....	0.010*	.....	0.010* al; 0.040* eth; 0.457* acet
I216	sulfate.....	Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	109.94	α monocl; β hex or rhomb, γ cub	2.221	.....	840	26.1*	23**	i abn al, acet
I217	sulfate, hydrogen.....	LiHSO <sub>4</sub> .....	104.01	col pr.....	2.123*	120	.....	d	.....	.....
I218	sulfate, mono-hydrate	Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O.....	127.95	col cr, monocl, 1.465, 1.477, 1.488	880	.....	34.9*	29.21*	.....	11.5* al + H <sub>2</sub> O (23.9% alco); i acet, pyridine
I219	sulfide.....	Li <sub>2</sub> S.....	45.94	wh-yel, cub, deliq	1.66	900-975	.....	v a	v a	v s al
I220	sulfide, hydro-.....	LiHS.....	40.01	wh powd, hygr.....	.....	.....	6	s	s al	.....
I221	sulfide, monohydrate	Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O.....	111.96	wh need, α 1.53, γ 1.59	455 d	140 - H <sub>2</sub> O	24.9*	22**	.....	i org solv
I222	tartrate.....	LiC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> .H <sub>2</sub> O.....	179.97	wh cr powd.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
I223	thallium di-tartrate	LiTIC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> .2H <sub>2</sub> O.....	395.41	tricl.....	3.144	.....	.....	.....	.....	.....
I224	thiocyanate.....	LiSCN.....	65.02	wh cr, deliq, m	1.333	.....	.....	.....	.....	s methylacet
I225	dithionate.....	Li <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> .2H <sub>2</sub> O.....	210.03	col, rhomb, 1.5602	2.158	d	.....	v a	.....	.....
I226	tungstate.....	Li <sub>2</sub> WO <sub>6</sub> .....	261.73	col, trig.....	3.71	742	.....	v a	v a	d a; i al
I227	Lutetium.....	Cassiopeium. Lu.....	174.97	met, hex.....	0.842	1032	3327	.....	.....	.....
1	Lithium n-Butyllithium.....	n-C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> Li.....	64.06	inflamm. liq.	0.785**	subl. vac.	d. 150	d.	d.	s. bz, eth.
2	Ethyllithium.....	LiC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> .....	36.00	hex. transp. pl.	.....	80-100 95 (in N <sub>2</sub> )	subl. 95	d.	.....	d. eth.; s. bz lgr.

Table 3.2.3 Solubility of candidate salts in aqueous solution<sup>(3)</sup> $\text{LiOH}$ 

t (C)	g/100ccH <sub>2</sub> O	wt%
0	11.91	10.64
10	12.11	10.80
20	12.35	10.99
25	12.54	11.14
30	12.70	11.27
40	13.22	11.68
50	13.79	12.12
60	14.63	12.76
80	16.56	14.21
100	19.12	16.05

 $\text{Li}_2\text{SO}_4$ 

t (C)	g/100ccH <sub>2</sub> O	wt%
0.6	36.07	26.51
14.0	35.26	26.07
16.7	35.06	25.96
19.6	34.86	25.85
31.8	34.17	25.47
38.0	33.83	25.28
43.7	33.33	25.00
51.6	33.01	24.82
52.4	32.82	24.71
65.7	32.17	24.34
77.0	31.67	24.05
94.8	31.16	23.76
103	31.10	23.72

 $\text{LiNO}_3$ 

t (C)	g/100ccH <sub>2</sub> O	wt%
0.1	53.37	34.8
10.5	61.03	37.9
12.1	61.81	38.2
13.75	64.74	39.3
19.05	67.79	40.4
22.1	75.13	42.9
27.55	89.75	47.3
29.47	115.84	53.67
29.55	138.27	58.03
43.4	155.10	60.8
50.5	158.40	61.3
55	170.27	63.0
60	174.73	63.6
64.2	184.90	64.9
70.9	194.99	66.1
80	204.0	67.11
90	217.8	68.54
100	233.7	70.03
110	251.6	71.56

 $\text{LiNO}_2$ 

t (C)	g/100ccH <sub>2</sub> O	wt%
0	70.94	41.5
19	95.69	48.9
25	103.67	50.9
38.5	124.72	55.5
42	132.02	56.9
49	153.81	60.6
49.5	157.73	61.2
65	176.24	63.8
81.5	219.49	68.7
91	262.32	72.4
96	1119	91.8

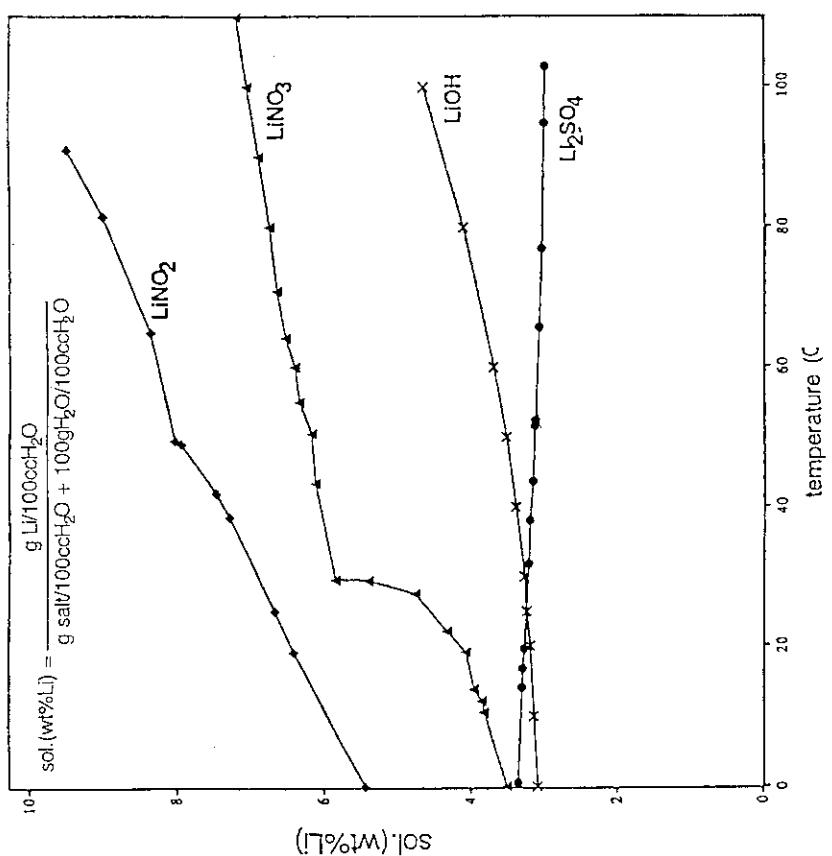


Fig. 3.2.1 Solubility of Li-salts in aqueous solution (3)

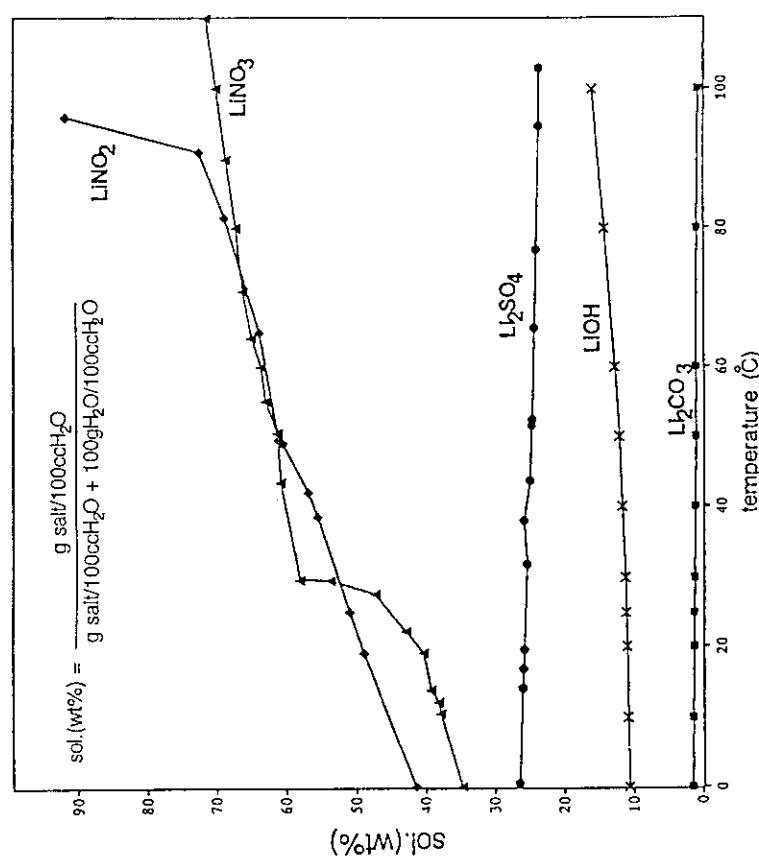


Fig. 3.2.2 Solubility of Li (connected with a salt) in aqueous solution (3)

### 3.3 リチウム塩水溶液の密度

リチウム塩水溶液のトリチウム増殖性能を予想する一つのパラメータとして単位体積あたりのLi原子数を知る必要がある。このためには、リチウム塩の分子式とともに水溶液の密度データが必要となる。リチウム塩水溶液の代表的な比重データをTable3.3.1～3.3.3にまとめた<sup>(1)～(3)</sup>。また、LiNO<sub>3</sub>水溶液のLi原子%を0～8%の範囲で変化させたときの溶液の密度<sup>(4)</sup>をFig.3.3.1に示す。

### 参考文献

- (1) 日本化学会編：“化学便覧基礎編”，改訂2版，丸善（1975）
- (2) Washburn,E.Wed.: “International Critical Tables of Numerical Data, Physics Chemistry and Technology”, MaGraw - Hill Book Company, Inc (1928)
- (3) Hellwegw,K.- H. ed.: “Landolt - Bornstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology”, New Series, Group IV, vol. 1, Springer - Verlag (1977)
- (4) Cooke,P.I.H., Grotz,S.P., Haswan,M.Z., Martin,R., Sharafat,S., Sze,D.- K., Wong, C.P.C. : UCLA - PPG - 1135, 10 (1988)

Table 3.3.1 Solution density of lithium compounds (1)

LiBr		Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		規定濃度水溶液の比重 $d_4^{15}$	
wt%	$d_4^{15}$	wt%	$d_4^{15}$	N	HCl
1	1.00428	1	1.0056	0.1	—
2	.01158	2	.0142	0.2	—
4	.02642	4	.0316	0.5	1.0041
6	.04161	6	.0491	1.0092	.0080
8	.05717	8	.0669	1.0122	.0201
10	.07313	10	.0848	.0170	.0388
20	.15988			.0353	.0470
30	.26081			2	.0798
40	.38117			3	—
50	.52878	1	1.00443	4	.1593
60	.71595	2	.01189		
LiCl		規定濃度水溶液の比重 $d_4^{15}$		LiNO <sub>3</sub>	
wt%	$d_4^{15}$	wt%	$d_4^{15}$	N	HCl
1	1.00292	6	.0279	—	—
2	.00870	8	.0592	—	—
4	.02019	10	.0753	—	—
6	.03162	20	.16680	—	—
8	.04303	30	.27472	—	—
10	.05449	40	.40485	—	—
12	.06602	50	.56565	—	—
14	.07765	60	.77646	—	—
16	.08941				
18	.10132				
20	.11342				
22	.12574				
24	.13831				
26	.15115				
28	.16228				
30	.17771				
35	.21274				
40	.25002				
45	.28980				

比重表使用上の注意

濃度： 特記しない限り溶液中の溶質の無水物の wt%

を示す。

温度：  $t_1^{\circ}\text{C}$  における溶液の  $t_2^{\circ}\text{C}$  の水に対する比重を示す。

Table 3.3.2 Solution density of lithium compounds (2)

LiI [JAB] (2<sup>6</sup>),  $\alpha$  (369)\*\*; (25, 287)\*; (45, 221, 225, 261, 319, 320, 322, 342, 519, 618),  $\alpha$  (151)

%	0°C	10°C	20°C	25°C	30°C	40°C	50°C	60°C	80°C	100°C
1	1.00746	1.00721	1.00563	1.00443	1.00300	0.99952	0.99530	0.9905	0.9790	0.9655
2	1.01514	1.01479	1.01312	1.01189	1.01043	1.00690	1.00264	0.9978	0.9863	0.9728
4	1.03083	1.03027	1.02843	1.02712	1.02560	1.02198	1.01763	1.0127	1.0011	0.9876
6	1.04697	1.04620	1.04418	1.04279	1.04120	1.03749	1.03305	1.0281	1.0163	1.0028
8	1.06358	1.06260	1.06039	1.05892	1.05726	1.05345	1.04892	1.0439	1.0320	1.0184
10	1.08069	1.07949	1.07708	1.07553	1.07380	1.06988	1.06527	1.0601	1.0481	1.0345
12	1.09832	1.09689	1.09428	1.09265	1.09085	1.08681	1.08212	1.0769	1.0648	1.0512
14	1.11649	1.11483	1.11202	1.11031	1.10844	1.10427	1.09950	1.0942	1.0819	1.0683
16	1.13523	1.13334	1.13033	1.12854	1.12660	1.12229	1.11744	1.1121	1.0996	1.0860
18	1.15457	1.15245	1.14924	1.14736	1.14535	1.14091	1.13597	1.1305	1.1179	1.1042
20	1.17455	1.17220	1.16878	1.16680	1.16472	1.16016	1.15512	1.1496	1.1368	1.1231
22	1.19520	1.19263	1.18898	1.18690	1.18475	1.18007	1.17491	1.1693	1.1564	1.1427
24	1.21656	1.21377	1.20988	1.20770	1.20547	1.20067	1.19538	1.1896	1.1766	1.1629
26	1.23867	1.23566	1.23152	1.22924	1.22692	1.22109	1.21657	1.2107	1.1976	1.1838
28	1.26156	1.25833	1.25395	1.25157	1.24915	1.24407	1.23853	1.2326	1.2193	1.2054
30	1.28527	1.28181	1.27720	1.27472	1.27219	1.26695	1.26130	1.2553	1.2418	1.2279
35	1.34859	1.34444	1.33928	1.33656	1.33382	1.32816	1.32218	1.3159	1.3020	1.2879
40	1.41839	1.41355	1.40783	1.40485	1.40188	1.39580	1.38948	1.3829	1.3686	1.3542
45	1.49582	1.49029	1.48399	1.48073	1.47751	1.47099	1.46433	1.4575	1.4428	1.4280
50	1.58235	1.57613	1.56922	1.56565	1.56215	1.55517	1.54816	1.5410	1.5255	1.5105
55	1.67986	1.67295	1.66538	1.66145	1.65764	1.65018	1.64279	1.6352	1.6192	1.6038
60	1.79074	1.78314	1.77481	1.77046	1.76631	1.75835	1.75052	1.7425	1.7260	1.7100
65					1.89559	1.89107	1.88259	1.87421	1.8658	1.8489

LiIO<sub>3</sub> [JAB] (2<sup>88</sup>)\*; (2<sup>50</sup>)\* [LJG]

%	$d_4^{14}$	%	$d_4^{18}$	%	$d_4^{14}$	%	$d_4^{18}$
1	1.0072	10	1.0915	20	1.2023	30	1.3328
2	1.0160	12	1.1120	22	1.2268	32	1.3619
4	1.0339	14	1.1333	24	1.2520	34	1.3925
6	1.0525	16	1.1555	26	1.2780	36	1.4248
8	1.0717	18	1.1785	28	1.3049	38	1.4590

LiNO<sub>3</sub> [JAB] (10, 84, 287),  $\alpha$  (256, 370)\*\*,  $\alpha$  (203)\*; (45, 106, 150, 250, 256, 342, 485, 517, 519, 529),  $\alpha$  (151, 605)

%	1	2	4	6	8	10
0°C	1.00616	1.01253	1.02533	1.03826	1.05135	1.06461
10°C	1.00578	1.01188	1.03418	1.03667	1.04935	1.06222
20°C	1.00409	1.01002	1.02198	1.03413	1.04647	1.05903
25°C	1.00287	1.00872	1.02054	1.03255	1.04477	1.05721
30°C	1.00142	1.00721	1.01892	1.03081	1.04291	1.05524
40°C	0.99788	1.00358	1.01509	1.02681	1.03875	1.05091
50°C	0.99365	0.99929	1.01068	1.02227	1.03406	1.04607
60°C	0.9888	0.9944	1.0057	1.0172	1.0289	1.0409
80°C	0.9774	0.9829	0.9942	1.0056	1.0173	1.0291
100°C	0.9639	0.9695	0.9808	0.9922	1.0039	1.0157
%	12	14	16	18	20	22
0°C	1.07804	1.09168	1.10554	1.11965	1.13401	1.14862
10°C	1.07529	1.08857	1.10208	1.11585	1.12989	1.14422
20°C	1.07181	1.08482	1.09807	1.11159	1.12539	1.13948
25°C	1.06987	1.08276	1.09590	1.10931	1.12300	1.13699
30°C	1.06780	1.08059	1.09363	1.10694	1.12053	1.13442
40°C	1.06330	1.07591	1.08877	1.10190	1.11532	1.12904
50°C	1.05830	1.07077	1.08349	1.09630	1.10980	1.12341
60°C	1.0530	1.0653	1.0780	1.0908	1.1040	1.1176
80°C	1.0411	1.0534	1.0659	1.0787	1.0918	1.1052
100°C	1.0278	1.0401	1.0527	1.0655	1.0786	1.0919
%	24	26	28	30	35	40
0°C	1.16351	1.17566	1.19406	1.20971	1.2510	
10°C	1.15883	1.17373	1.18893	1.20435	1.2451	
20°C	1.15387	1.16857	1.18355	1.19879	1.2392	1.2837
25°C	1.15128	1.16588	1.18076	1.19592	1.2361	1.2804
30°C	1.14861	1.16311	1.17790	1.19298	1.2330	1.2771
40°C	1.14308	1.15744	1.17209	1.18703	1.2267	1.2706
50°C	1.13734	1.15159	1.16613	1.18097	1.2204	1.2640
60°C	1.1314	1.1456	1.1601	1.1748	1.2139	1.2572
80°C	1.1189	1.1330	1.1473	1.1619	1.2007	1.2436
100°C	1.1056	1.1196	1.1338	1.1484	1.1870	1.2206

Table 3.3.2 (Continued)

LiBr [JAB] (26),  $\alpha$  (367)\*\*; (25, 287)\*; (45, 221, 319, 322, 366, 519, 618),  $\alpha$  (151)

%	0°C	10°C	20°C	25°C	30°C	40°C	50°C	60°C	80°C	100°C
1	1.00731	1.00705	1.00547	1.00428	1.00285	0.99939	0.99519	0.9904	0.9790	0.9656
2	1.01484	1.01447	1.01280	1.01158	1.01013	1.00663	1.00241	0.9976	0.9862	0.9729
4	1.03012	1.02953	1.02769	1.02642	1.02492	1.02135	1.01708	1.0123	1.0009	0.9877
6	1.04574	1.04494	1.04293	1.04161	1.04006	1.03642	1.03211	1.0273	1.0159	1.0029
8	1.06173	1.06072	1.05854	1.05717	1.05537	1.05186	1.04752	1.0427	1.0313	1.0184
10	1.07812	1.07690	1.07455	1.07313	1.07148	1.06770	1.06334	1.0585	1.0471	1.0344
12	1.09493	1.09351	1.09099	1.08952	1.08782	1.08397	1.07959	1.0747	1.0634	1.0508
14	1.11219	1.11057	1.10789	1.10636	1.10461	1.10069	1.09629	1.0914	1.0801	1.0676
16	1.12993	1.12811	1.12528	1.12363	1.12188	1.11789	1.11347	1.1086	1.0972	1.0849
18	1.14817	1.14618	1.14318	1.14151	1.13965	1.13560	1.13115	1.1262	1.1149	1.1027
20	1.16895	1.16476	1.16162	1.15988	1.15795	1.15384	1.14936	1.1444	1.1331	1.1210
22	1.18631	1.18394	1.18063	1.17882	1.17682	1.17264	1.16813	1.1632	1.1519	1.1399
24	1.20628	1.20372	1.20024	1.19835	1.19629	1.19204	1.18750	1.1826	1.1713	1.1593
26	1.22689	1.22413	1.22047	1.21850	1.21639	1.21207	1.20750	1.2026	1.1913	1.1794
28	1.24817	1.24520	1.24135	1.23931	1.23716	1.23277	1.22815	1.2232	1.2119	1.2001
30	1.27017	1.26697	1.26292	1.26081	1.25862	1.25417	1.24949	1.2445	1.2333	1.2215
35	1.32850	1.32477	1.32040	1.31813	1.31582	1.31115	1.30629	1.3012	1.2899	1.2782
40	1.39233	1.38827	1.38360	1.38117	1.37871	1.37376	1.36869	1.3635	1.3520	1.3404
45	1.46259	1.45851	1.45354	1.45095	1.44829	1.44299	1.43767	1.4323	1.4207	1.4092
50					1.52878	1.52534	1.52010	1.51448	1.5089	1.4971
55					1.61637	1.61302	1.60673	1.60074	1.5948	1.5829
60					1.71595	1.71198	1.70499	1.69853	1.6923	1.6800
65					1.83037	1.82547	1.81756	1.81049	1.8038	1.7913

LiCl [JAB] (26),  $\alpha$  (384, 387, 370)\*\*; (25, 150, 250, 256)\*; (1, 38, 45, 64, 73, 106, 125, 204, 208, 219, 221, 223, 224, 225, 239, 274, 304, 312, 313, 342, 344, 347, 363, 374, 379, 386, 486, 487, 519, 529, 530, 573, 618, 629, 633),  $\alpha$  (38, 151, 219, 256, 448, 606, 609)

%	0°C	10°C	20°C	25°C	30°C	40°C	50°C	60°C	80°C	100°C
1	1.00604	1.00574	1.00411	1.00292	1.00150	0.99806	0.99391	0.9891	0.9779	0.9646
2	1.01213	1.01168	1.00993	1.00870	1.00726	1.00381	0.99969	0.9950	0.9838	0.9708
4	1.02417	1.02344	1.02148	1.02019	1.01872	1.01527	1.01121	1.0066	0.9958	0.9831
6	1.03606	1.03509	1.03296	1.03161	1.03012	1.02668	1.02269	1.0182	1.0077	0.9953
8	1.04787	1.04670	1.04443	1.04303	1.04152	1.03809	1.03418	1.0298	1.0196	1.0076
10	1.05966	1.05833	1.05594	1.05449	1.05296	1.04954	1.04571	1.0414	1.0315	1.0199
12	1.07148	1.07002	1.06752	1.06602	1.06447	1.06107	1.05731	1.0532	1.0435	1.0322
14	1.08337	1.08180	1.07919	1.07765	1.07608	1.07271	1.06901	1.0650	1.0558	1.0447
16	1.09536	1.09369	1.09098	1.08941	1.08782	1.08449	1.08084	1.0769	1.0679	1.0572
18	1.10749	1.10571	1.10292	1.10132	1.09972	1.09643	1.09283	1.0890	1.0802	1.0700
20	1.11979	1.11789	1.11504	1.11342	1.11181	1.10855	1.10500	1.1013	1.0927	1.0829
22	1.13228	1.13027	1.12736	1.12574	1.12412	1.12083	1.11738	1.1137	1.1053	1.0960
24	1.14499	1.14237	1.13991	1.13831	1.13667	1.13344	1.12999	1.1264	1.1181	1.1093
26	1.15794	1.15571	1.15271	1.15115	1.14949	1.14625	1.14285	1.1393	1.1310	1.1228
28	1.17115	1.16881	1.16578	1.16428	1.16260	1.15933	1.15598	1.1525	1.1442	1.1367
30	1.18464	1.18219	1.17914	1.17771	1.17602	1.17269	1.16940	1.1659	1.1576	1.1507
35					1.21274	1.21092	1.20738	1.20402		
40					1.25002	1.24806	1.24427	1.24081		
45					1.28980	1.28768	1.28361	1.28003		

LiCl<sub>4</sub>

% (373) | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.04

 $d_4^{10,004}$  | 0.998 2908 | 0.998 3498 | 0.998 4087 | 0.998 4676LiClO<sub>4</sub> [JAB] (288)\*\*; (442) [LJG]

%	$d_4^{10}$	%	$d_4^{10}$	%	$d_4^{10}$	%	$d_4^{10}$
1	1.0048	6	1.0365	12	1.0764	18	1.1190
2	1.0111	8	1.0495	14	1.0903		
4	1.0237	10	1.0628	16	1.1045		

Table 3.3.2 (Continued)

LiOH [JAB] (73, 290)**; (225, 342, 519, 529)					
%	0°C	10°C	20°C	25°C	30°C
1	1.0122	1.0115	1.0102	1.0090	1.0075
2	1.0240	1.0230	1.0217	1.0203	1.0188
4	1.0468	1.0456	1.0437	1.0422	1.0407
6	1.0690	1.0674	1.0650	1.0636	1.0621
8	1.0908	1.0888	1.0862	1.0847	1.0830
10	1.1125	1.1102	1.1074	1.1057	1.1038
%	40°C	50°C	60°C	80°C	
1	1.0041	1.0000	0.9958	0.9860	
2	1.0155	1.0114	1.0072	0.9973	
4	1.0371	1.0331	1.0286	1.0189	
6	1.0582	1.0541	1.0496	1.0397	
8	1.0790	1.0747	1.0701	1.0600	
10	1.0998	1.0952	1.0906	1.0803	

Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> [JAB] (250, 291), α (370)**; (616), α (203)*; (1, 76, 106, 150, 204, 225, 312, 342, 344, 405, 477, 519, 529, 618, 629), α (151)						
%	1	2	4	6	8	10
0°C	1.0089	1.0179	1.0360	1.0543	1.0726	1.0910
10°C	1.0084	1.0173	1.0350	1.0528	1.0709	1.0890
20°C	1.0068	1.0155	1.0329	1.0505	1.0684	1.0863
25°C	1.0056	1.0142	1.0316	1.0491	1.0669	1.0848
30°C	1.0042	1.0128	1.0301	1.0476	1.0653	1.0831
40°C	1.0007	1.0092	1.0264	1.0439	1.0615	1.0792
50°C	0.9964	1.0049	1.0221	1.0396	1.0572	1.0749
60°C	0.9917	1.0001	1.0174	1.0349	1.0526	1.0703
80°C	0.9801	0.9886	1.0061	1.0238	1.0416	1.0595
100°C	0.9669	0.9756	0.9932	1.0111	1.0292	1.0474
%	12	14	16	18	20	22
0°C	1.1095	1.1280	1.1465	1.1656		
10°C	1.1073	1.1256	1.1441	1.1629		
20°C	1.1044	1.1228	1.1411	1.1599	1.1789	1.1984
25°C	1.1029	1.1212	1.1394	1.1582		
30°C	1.1012	1.1193	1.1376	1.1565		
40°C	1.0972	1.1153	1.1335	1.1526		
50°C	1.0929	1.1109	1.1291	1.1483		
60°C	1.0882	1.1063	1.1246	1.1437		
80°C	1.0776	1.0959	1.1143	1.1335		
100°C	1.0658	1.0844	1.1028	1.1220		
%	24					

LiCHO <sub>3</sub> , Formate [JAB] (291)**; (329)						
%	d <sub>4</sub> <sup>18</sup>	%	d <sub>4</sub> <sup>18</sup>	%	d <sub>4</sub> <sup>18</sup>	%
1	1.0035	6	1.0285	12	1.0583	18
2	1.0085	8	1.0385	14	1.0690	20
4	1.0185	10	1.0486	16	1.0793	
LiC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> , Acetate [JAB] (288)**; (529)						
%	d <sub>4</sub> <sup>18</sup>	%	d <sub>4</sub> <sup>18</sup>	%	d <sub>4</sub> <sup>18</sup>	%
1	1.0024	8	1.0297	16	1.0616	24
2	1.0063	10	1.0376	18	1.0698	
4	1.0141	12	1.0455	20	1.0780	
6	1.0219	14	1.0535	22	1.0863	
LiC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , Acid malate [JAB] (546)						
%	d <sub>4</sub> <sup>18</sup>	%	d <sub>4</sub> <sup>18</sup>	%	d <sub>4</sub> <sup>18</sup>	%
1	1.0033	10	1.0496	20	1.1031	30
2	1.0084	12	1.0601	22	1.1141	35
4	1.0186	14	1.0707	24	1.1253	40
6	1.0288	16	1.0814	26	1.1366	45
8	1.0391	18	1.0922	28	1.1480	50

Li <sub>2</sub> C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub> , Malate [JAB] (546)						
%	d <sub>4</sub> <sup>18</sup>	%	d <sub>4</sub> <sup>18</sup>	%	d <sub>4</sub> <sup>18</sup>	%
1	1.0043	10	1.0600	20	1.1231	30
2	1.0105	12	1.0725	22	1.1360	35
4	1.0228	14	1.0851	24	1.1489	40
6	1.0352	16	1.0977	26	1.1619	
8	1.0476	18	1.1103	28	1.1749	

LiCNS [JAB] (291) [LJG]						
%	d <sub>4</sub> <sup>18</sup>	%	d <sub>4</sub> <sup>18</sup>	%	d <sub>4</sub> <sup>18</sup>	%
1	1.0025	6	1.0220	12	1.0458	18
2	1.0064	8	1.0299	14	1.0538	
4	1.0142	10	1.0378	16	1.0619	

Table 3.3.3 Solution density of lithium compounds<sup>(3)</sup>1.2 Densities abs. [g/cm<sup>3</sup>] and relat. of binary aqueous systems: inorganic — water

## 1.2 Anorganische Stoffe — Wasser — Inorganic substances — water

Umrechnungsformeln für verschiedene Konzentrationen —  
Conversion formulae for different concentrations

Zwischen den in der Literatur verwendeten Konzentrationen in den folgenden Einheiten

- $a$  in Molprozent (Mol-%)
- $b$  in Gewichtsprozent (Gew.-%)
- $a'$  in g-Mol gelöster Stoff/Liter Lösung (molar)
- $b'$  in g gelöster Stoff/Liter Lösung
- $a''$  in g-Mol gelöster Stoff/1000 g Lösungsmittel (molal)
- $b''$  in g gelöster Stoff/1000 g Lösungsmittel

bestehen in binären Systemen folgende Beziehungen (die Konzentrationseinheiten beziehen sich auf die Komponente  $X_1$  mit dem Molgewicht  $M_1$  in g/Mol):

The following relations hold in binary systems when the concentrations used in the literature are given in the following units

- $a$  in mole % (Mol-%)
- $b$  in weight % (Gew.-%)
- $a'$  in g-moles dissolved substance/liter of solution (molar)
- $b'$  in g dissolved substance/liter of solution
- $a''$  in g-moles dissolved substance/1000 g of solvent (molal)
- $b''$  in g dissolved substance/1000 g solvent

and when the units of concentration relate to the component  $X_1$  with molar weight  $M_1$  in g/Mol:

$$\begin{aligned} a &= \frac{100b}{b + (100-b)\frac{M_1}{M_2}} = \frac{100a'}{a' + (1000 \cdot \varrho - M_1 \cdot a')/M_2} = \frac{100b'}{b' + (1000 \cdot \varrho - b')\frac{M_1}{M_2}} \\ &= \frac{100a''}{a'' + 1000/M_2} = \frac{100b''}{b'' + 1000\frac{M_1}{M_2}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$b = \frac{100aM_1}{aM_1 + (100-a)M_2} = a'M_1/10\varrho = b'/10\varrho = \frac{100a''M_1}{1000 + a''M_1} = 100b''/(1000 + b'') \quad (2)$$

$$a' = \frac{1000a\varrho}{a \cdot M_1 + (100-a) \cdot M_2} = 10 \cdot b \cdot \varrho/M_1 = b'/M_1 = \frac{1000a''\varrho}{1000 + a''M_1} = \frac{1000b''\varrho}{M_1(1000 + b'')} \quad (3)$$

$$b' = \frac{1000aM_1\varrho}{a \cdot M_1 + (100-a) \cdot M_2} = 10b\varrho = a'M_1 = \frac{1000a''M_1\varrho}{1000 + a''M_1} = \frac{1000 \cdot b'' \cdot \varrho}{1000 + b''} \quad (4)$$

$$a'' = \frac{1000a}{(100-a)M_2} = \frac{1000b}{(100-b)M_1} = \frac{1000a'}{(1000\varrho - a'M_1)} = \frac{1000b'}{(1000\varrho - b')M_1} = \frac{b''}{M_1} \quad (5)$$

$$b'' = \frac{1000aM_1}{(100-a)M_2} = \frac{1000b}{(100-b)} = \frac{1000a'M_1}{(1000\varrho - a'M_1)} = \frac{1000b'}{1000\varrho - b'} = a''M_1 \quad (6)$$

$$M_1 = M(H_2O) = 18.0153.$$

Table 3.3.3 (Continued)

LiBr									M = 86,85
Gew.-%	2	5	10	15	20	25	30	35	
0 °C	1,0148	1,0379	1,0781	1,1210	1,1671	1,2166	1,2705	1,3287	
20 °C	1,0128	1,0353	1,0746	1,1166	1,1616	1,2103	1,2629	1,3204	
40 °C	1,0066	1,0289	1,0677	1,1093	1,1538	1,2022	1,2542	1,3112	
60 °C	0,9976	1,0198	1,0585	1,0996	1,1442	1,1927	1,2444	1,3011	
80 °C	0,9860	1,0084	1,0473	1,0886	1,1331	1,1817	1,2335	1,2901	
100 °C	0,9729	0,9953	1,0344	1,0760	1,1208	1,1692	1,2215	1,2782	
Gew.-%	40	45	50	55	60	65			
0 °C	1,3923	1,4633	—	—	—	—			
20 °C	1,3836	1,4539	1,5325	1,6217	1,7220	1,838			
40 °C	1,3740	1,4436	1,5215	1,6095	1,7085	1,821			
60 °C	1,3636	1,4330	1,5105	1,5970	1,6950	1,807			
80 °C	1,3524	1,4219	1,4985	1,5850	1,6825	1,794			
100 °C	1,3404	1,4101	1,4865	1,5730	1,6700	1,782			
LiBrO <sub>3</sub>									M = 134,85
Gew.-%	2	4	5	6	8	10			
20 °C	1,0135	1,0293	1,0375	1,0507	1,0625	1,0799			
25 °C	1,0124	1,0281	1,0361	1,0491	1,0607	1,0779			
LiCl									M = 42,39
Gew.-%	2	5	10	15	20	25	30	35	
0 °C	1,0121	1,0301	1,0597	1,0894	1,1207	1,1527	1,1860	—	
20 °C	1,0097	1,0270	1,0559	1,0851	1,1155	1,1471	1,1800	1,2152	
40 °C	1,0038	1,0210	1,0495	1,0786	1,1086	1,1398	1,1732	1,2081	
60 °C	0,9949	1,0122	1,0410	1,0706	1,1008	1,1328	1,1665	1,2013	
80 °C	0,9838	1,0017	1,0315	1,0615	1,0923	1,1245	1,1588	1,1937	
100 °C	0,9708	0,9892	1,0199	1,0509	1,0829	1,1160	1,1507	1,1864	
Gew.-%	40	45							
0 °C	—	—							
20 °C	1,2523	1,2950							
40 °C	1,2452	1,2845							
60 °C	1,2380	1,2765							
80 °C	1,2305	1,2680							
100 °C	1,2224	1,2590							
LiClO <sub>4</sub>									M = 106,39
Gew.-%	2	5	10	15	20	25	30	35	37
20 °C	1,0101	1,0287	1,0606	1,0945	1,1300	1,1673	1,2079	1,2511	1,2691
LiClO <sub>3</sub>									M = 90,39
Gew.-%	2	5	10	15	20	25	30	35	
20 °C	1,0107	1,0309	1,0645	1,1000	—	—	—	—	
25 °C	1,0098	1,0295	1,0628	1,0980	1,1352	1,1748	1,2162	1,2620	
Gew.-%	40	50	60	65	70	75			
25 °C	1,313	1,424	1,546	1,614	1,688	1,779			

Table 3.3.3 (Continued)

LiJ								M = 133,84	
Gew.-%	2	5	10	15	20	25	30		
0 °C	1,0151	1,0389	1,0807	1,1258	1,1746	1,2276	1,2853		
20 °C	1,0131	1,0363	1,0771	1,1211	1,1688	1,2207	1,2772		
40 °C	1,0069	1,0297	1,0699	1,1133	1,1601	1,2114	1,2672		
60 °C	0,9978	1,0204	1,0601	1,1031	1,1494	1,2002	1,2555		
80 °C	0,9863	1,0087	1,0481	1,0907	1,1369	1,1875	1,2425		
100 °C	0,9728	0,9952	1,0345	1,0770	1,1231	1,1733	1,2265		
Gew.-%	35	40	45	50	55	60	65		
0 °C	1,3486	1,4184	1,4958	1,5824	1,6799	1,7905	1,9162		
20 °C	1,3393	1,4078	1,4840	1,5692	1,6654	1,7748	1,8995		
40 °C	1,3282	1,3958	1,4712	1,5552	1,6504	1,7589	1,8827		
60 °C	1,3157	1,3827	1,4576	1,5407	1,6351	1,7428	1,8658		
80 °C	1,3020	1,3689	1,4434	1,5258	1,6196	1,7265	1,8487		
100 °C	1,2879	1,3542	1,4280	1,5105	1,6038	1,7100	1,8315		
LiJO <sub>3</sub>								M = 181,84	
Gew.-%	2	5	10	15	20	25	30	35	40
20 °C	1,0156	1,0429	1,0910	1,1440	1,2015	1,2640	1,3318	1,4070	1,4882
Gew.-%	44,6								
18 °C	1,568								
LiNO <sub>3</sub>								M = 68,94	
Gew.-%	2	5	10	15	20	25	30	35	40
0 °C	1,0125	1,0318	1,0646	1,0986	1,1342	1,1711	1,2097	1,2511	1,2965
20 °C	1,0100	1,0280	1,0590	1,0914	1,1254	1,1612	1,1988	1,2392	1,2837
40 °C	1,0036	1,0209	1,0509	1,0823	1,1152	1,1503	1,1871	1,2268	1,2706
60 °C	0,9944	1,0114	1,0405	1,0716	1,1040	1,1385	1,1747	1,2140	1,2572
80 °C	0,9829	0,9999	1,0291	1,0596	1,0918	1,1259	1,1618	1,2007	1,2435
100 °C	0,9695	0,9865	1,0157	1,0464	1,0786	1,1126	1,1484	1,1870	1,2296
LiOH								M = 23,95	
Gew.-%	2	5	10						
0 °C	1,0240	1,0579	1,1125						
20 °C	1,0217	1,0543	1,1074						
40 °C	1,0160	1,0476	1,1000						
60 °C	1,0079	1,0392	1,0908						
80 °C	0,9973	1,0293	1,0803						
100 °C	0,985	1,0178	1,0684						
Li <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>								M = 109,94	
Gew.-%	2	5	10	15	20	25			
0 °C	1,0179	1,0451	1,0910	1,1372	1,1847	1,234			
20 °C	1,0155	1,0417	1,0863	1,1320	1,1792	1,228			
40 °C	1,0092	1,0351	1,0792	1,1244	1,1714	1,220			
60 °C	1,0001	1,0261	1,0699	1,1154	—	—			
80 °C	0,9886	1,0149	1,0595	1,1051	—	—			
100 °C	0,9753	1,0021	1,0474	1,0936	—	—			

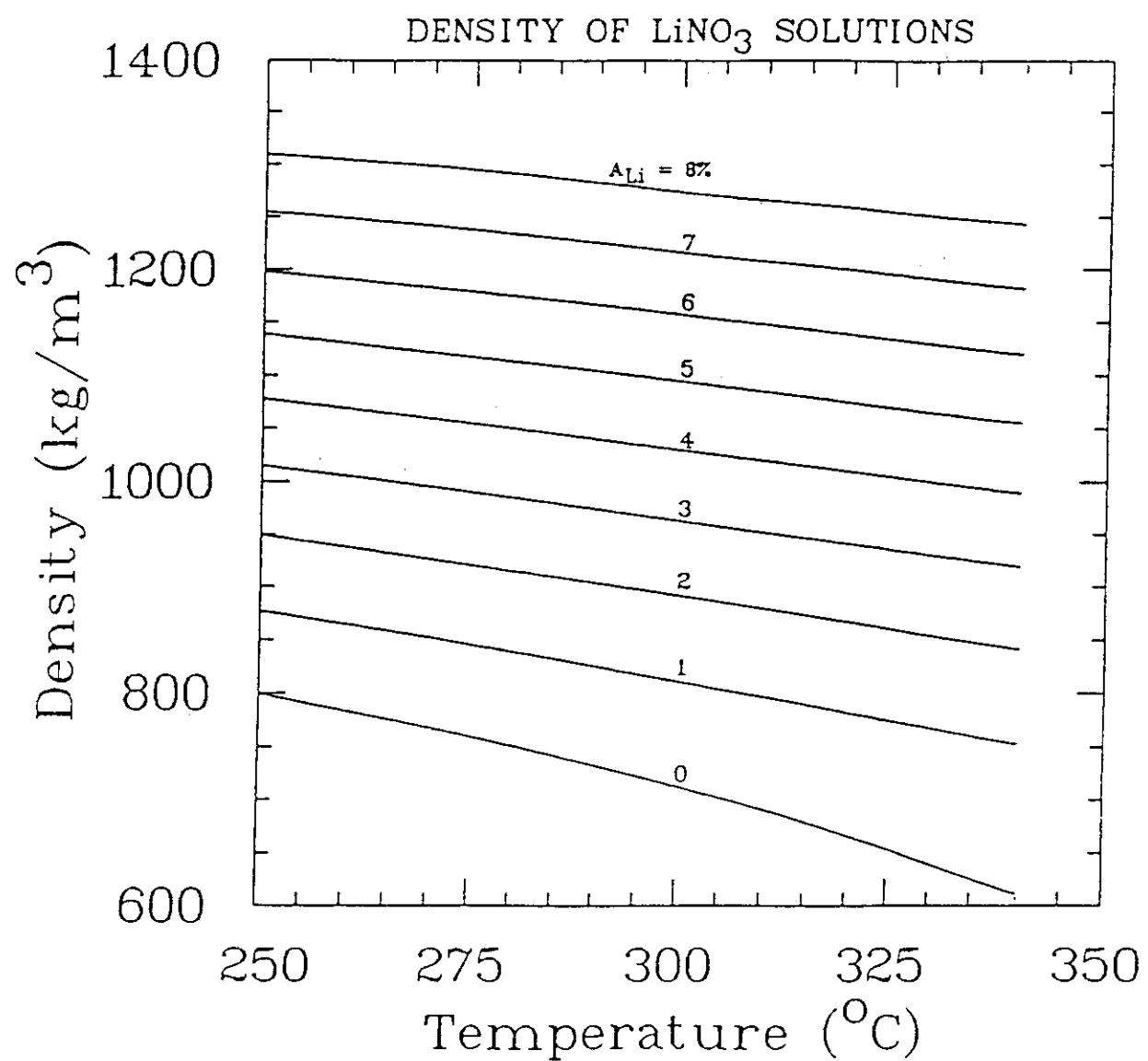


Fig. 3.3.1 Density of  $\text{LiNO}_3$  solutions at various temperatures and for  
for a range of lithium atom percentages.<sup>(4)</sup>

### 3.4 リチウム塩水溶液と構造材（ステンレス鋼）<sup>(1)～(5)</sup>との共存性

前節までの検討によりブランケット材候補として絞り込んだリチウム塩のうち、比較的データが多い硝酸リチウム及び水酸化リチウムの水溶液と構造材との共存性について検討する。

#### 3.4.1 構造材（ステンレス鋼）選定

ブランケットでは、放射線、熱、電磁力、圧力等の環境が極めて過酷になると予想されることから構造材の選択が重要な課題となっている。とくに、ブランケットが半永久的な機器となる原型炉や動力炉に使用できる構造材の開発は、核融合炉実現のための必須課題となっている。以下に、ITER等の実験炉用構造材に求められる主要な課題を列挙する。

- ① 加工・溶接性
- ② 中性子照射損傷に対する耐久性
- ③ 冷却材との共存性
- ④ トリチウム増殖材、中性子増倍材（ベリリウム）との共存性
- ⑤ 熱的特性

なお、ITERでは、炉寿命における中性子フルーレンスを  $1\text{MWa}/\text{m}^2$  程度とし、現時点で最も現実的な材料としてオーステナイト系のSUS316鋼を設計基準材料に選定している。NETでは、SUS316とともにマルテンサイト系の1.4914鋼（Table3.4.1参照）が検討された<sup>(6)～(10)</sup>。

ところで、ステンレス鋼は、約12%以上のCrを含むFe-Cr-(Ni)合金であり、その組成上の区別から(i) Cr系、及び(ii) Cr-Ni系の2通りに大別されている。また、金属組織上の区別では、前者はさらに①マルテンサイト系、及び②フェライト系に、後者は①オーステナイト系、②オーステナイト・フェライト系、及び③析出硬化系に分けられている。これらのステンレス鋼の改良、発展の過程をFig.3.4.1に模式的に示す<sup>(1)</sup>。また、JISに制定されている各種ステンレス鋼の化学組成をTable3.4.1に示す<sup>(9), (10)</sup>。ステンレス鋼の機械的性質その他の物理値は、各種便覧類<sup>(1)～(5)</sup>を参考することとしてここでは割愛した。

#### 3.4.2 ステンレス鋼の腐食形態

##### (1) 湿式腐食

通常の純度の温水に接した均質のステンレス鋼は、不働態を形成しほぼ完全な耐食性を示す。しかし、不純物等の作用により不働態が形成されない場合には、以下のような様々な形態の腐食が起こる<sup>(11)</sup>。

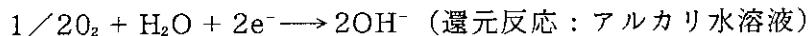
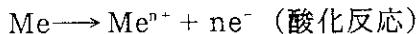
- ① 全面腐食（均一腐食）
- ② 異種金属接触腐食
- ③ 隙間腐食
- ④ 孔食
- ⑤ 粒界腐食
- ⑥ 脱成分腐食
- ⑦ エロージョン・コロージョン

⑧ 応力腐食割れ

⑨ 水素脆化、その他

水溶液中の腐食は電気化学的過程で起こるとされ、電解質を含む水溶液中ではアノードとカソードにより構成される腐食電池が形成されると考えられている。

アノード及びカソードでは、それぞれ次のような反応が生じる。



これらの模式的な反応機構をFig.3.4.2に示す。アノードとカソードでの酸化・還元反応が均一に進行している場合には全面腐食となり、部分的に進行する場合には局所腐食となる。

腐食反応に伴って流れる電流を  $i_{corr}$  とすると、金属の腐食速度  $dW/dt$  及び腐食量  $W$  は Faraday の法則より、それぞれ次式で表される。

$$dW/dt/S = Mi_{corr}/nF$$

$$W = SMi_{corr}t/nF$$

ここで、S, M, nはそれぞれ金属の見掛けの表面積、原子量及び原子価であり、tは腐食時間、FはFaraday定数である。なお、腐食速度に関する諸単位の換算係数をTable3.4.2にまとめた。

(2) 不働態形成

典型的な金属電極のアノード分極曲線をFig.3.4.3に示す。電流密度  $i_{corr}$  は、活性態領域では電極電位とともに増加（腐食が進行）し、ある限界電位 ( $E_p$ ) を越えると急激に減少する。電位が  $E_t$  に達するまでの低電流条件  $i_p$  が不働態域に相当する。一般に、不働態化した金属はの溶解速度は非常に小さいので、耐食性状態にあると見なされる。不働態電位域の電流  $i_p$  は、耐食性の目安となる。

(3) 腐食速度に及ぼすpHの影響

鉄の各化学種間の平衡関係を表した電位-pH図 (Fig.3.4.4)<sup>(12)</sup> より、腐食域がpHとともに複雑に変化することが分かる。ステンレス鋼の腐食に対するpH効果の測定例をFig.3.4.5に示す<sup>(14)</sup>。pHの値が10以上の範囲で腐食速度が著しく減少し、割れに至までの時間が大幅に長くなる事が分かる。アルカリ水溶液での金属の腐食速度は、一般に酸性水溶液よりも小さい (Fig.3.4.6) が、高温ではFig.3.4.7に見られるように濃度と共に大幅に増加する。これは、可溶性の鉄酸アルカリあるいはクロム酸アルカリ等が金属表面に形成されるためと考えられている<sup>(15)</sup>。また、一般にアルカリ水溶液の腐食性はアルカリ金属の原子量が大きいほど激しくなる。

(4) 腐食速度に及ぼす温度の影響

Fig.3.4.8及びFig.3.4.9は、水酸化アルカリ水溶液における軟鉄の腐食速度を示す<sup>(16), (17)</sup>。腐食速度が温度と共に増加すること、アルカリイオンの原子量が小さいほど腐食速度が小さいことが分かる。ステンレス鋼の場合も、Fig.3.4.10に示すように、腐食速度は温度と共に増加する<sup>(18)</sup>。Fig.3.4.11は、ステンレス鋼のアルカリ割れに対する温度の影響と割れの低減化処理の効果を示す<sup>(19)</sup>。これによれば、通常のステンレス鋼は温度100°Cで非常に短時間で割れを生ずるのに対し、非鋭敏化処理（高ニッケル合金化）すると300°Cでも長時間使用可能となる。Fig.

3.4.12～3.4.14は、種々のアルカリ水溶液におけるステンレス鋼の腐食割れの温度影響に関するデータである<sup>(19)～(21)</sup>。

#### (5) 腐食速度に及ぼす濃度の影響

水酸化アルカリ水溶液における軟鉄の腐食速度と濃度の関係をFig.3.4.15～Fig.3.4.16及びTable3.4.3に示す<sup>(17), (21)</sup>。腐食速度が濃度と共に増加すること、アルカリイオンの原子量が小さいほど腐食速度が小さいことが分かる。ステンレス鋼の腐食速度もFig.3.4.10に示したように、温度と共に増加する<sup>(17)</sup>。ジルカロイの水酸化リチウム水溶液中の腐食速度データをFig.3.4.17に示す<sup>(17)</sup>。各濃度における腐食速度は時間に対して一定であるが、0.06Mの場合には約50日後に腐食速度の増加が起こっている。一般に、時間の経過に伴う不働態膜の形成により、金属表面における腐食速度は減少するが、この事実はある濃度では孔食等の進行により腐食が加速されることを示している(Fig.3.4.18)<sup>(22)</sup>。

#### (6) 腐食速度に及ぼす溶存酸素の影響

酸素が腐食速度に及ぼす影響は、酸素の還元反応がカソード反応を促進し腐食速度を増加する場合と、金属表面に安定な酸化膜を形成し腐食速度を減少する場合とが知られている。Fig.3.4.19に示したように、3.5%食塩水溶液での18-8ステンレス鋼の腐食速度が酸素分圧0.2kg/cm<sup>2</sup>で極大となるのに対し、鋼の腐食速度は酸素分圧とともに増加する<sup>(23)</sup>。また、Fig.3.4.20に示すように、鉄の腐食速度は、解放系(a)では水の温度上昇に伴う酸素溶解度の低下のため大きく減少するのに対し、密閉系では酸素溶解度の低下が起らぬいため温度上昇とともに増加する<sup>(48)</sup>。同様の傾向は、Fig.3.4.21に示すように、空気を飽和した5%硫酸水溶液中のモネルの腐食速度と温度との関係にも見られる。Fig.3.4.22では、NaClの添加濃度の増加につれて酸素の溶解度が減少するため、腐食速度が減少している。応力腐食割れに及ぼす酸素の影響については、Fig.3.4.23に示すデータが報告されている<sup>(24)</sup>。

#### (7) 腐食速度に及ぼす溶存イオンの影響

インヒビターと呼ばれる金属の腐食速度を低下させる効果を持つ添加物が知られている。Fig.3.4.3中の水酸化リチウムやFig.3.4.24中のポリ磷酸ナトリウム等がインヒビターに相当している<sup>(25)</sup>。インヒビターの添加によるステンレス鋼の腐食分極曲線の変化の様子をFig.3.4.25(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>添加)及び2.4.26(アニオン添加)に示す<sup>(26), (27)</sup>。いずれもインヒビターの顕著な抑制効果を表している。Fig.3.4.27では、ステンレス鋼のアルカリ割れの防止にNa<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>の添加が有効であることを示した<sup>(28)</sup>。なお、Fig.3.4.28では添加されるカチオンの種類により鉄の腐食速度に大きな差異が生ずること、Fig.3.4.29では添加されるアニオンのちがいによりステンレス鋼の応力腐食割れに対する感受性が異なる<sup>(19)</sup>ことが分かる。

#### (8) 腐食速度に及ぼす流速の影響

Fig.3.4.30は、腐食速度に対する流速の影響を模式的に示したものである<sup>(19)</sup>。低流速域における腐食速度の増加は、金属表面への酸素の拡散が促進されるためであり、金属の不働態化が起らぬ場合には流速とともに腐食速度は増大する。不働態化が起る場合には、腐食速度は低下するが、流速がさらに増加するとエロージョン・コロージョンあるいは衝撃腐食による加速された腐食が起こる。Fig.3.4.31は、鉄の腐食速度に対する比較的初期の段階の流速効果を示すものである<sup>(31)</sup>。一方、金属表面の流速が均一でない場合には、局部的な濃淡電池が形成さ

れ局所的な腐食が進行することが知られている<sup>(30)</sup>。例えば、海水の流速が不均一の場合には、低流速側で浸食が起こると言われている。海水中の鉄に形成される電位と流速の関係を示すFig. 3.4.32<sup>(30)</sup> より、流速とともに電位が増加することが分かる。

#### (9) 腐食速度に及ぼす放射線の影響

放射線照射により水が分解してH, O及びOHを生成し、それらがステンレス鋼の水素脆化や応力腐食割れの原因となることは良く知られた事実であり、現在多くの研究がなされている。Fig.3.4.33は、SUS304ステンレス鋼の応力腐食割れに関する実験結果の一例を示すものであり、放射線照射により割れが生じ易くなることを示唆している<sup>(31)</sup>。ステンレス鋼の割れの成長速度と照射線量との関係を計算により予測したものをFig.3.4.34に示す<sup>(32)</sup>。照射線量とステンレス鋼の表面近傍に析出する燐の量との関係を示したFig.3.4.35では、粒界に偏析した燐が割れの原因となる事を示唆している<sup>(33)</sup>。Table3.4.4は、 $\gamma$ 線の照射効果に基づく応力腐食割れに対して $H_2O_2$ が有効な抑制剤となることを示している<sup>(35)</sup>。

### 3.4.3 リチウム塩水溶液とステンレス鋼の共存性

#### (1) 水酸化リチウム水溶液

核融合プランケットの運転条件に相当する高温、高圧、高濃度の水酸化リチウム塩水溶液とステンレス鋼との腐食に関するデータは、現在のところ皆無に近いと言える。例えば、PWRの一次冷却水の腐食性に関する実験では、リチウム塩の濃度は極めて稀薄（数mg-LiOH/l, pH濃度で10程度）であり、プランケットの設計・評価データとして使用することはできない。

プランケットへのLiOHの適用の可能性を検討する目的でSUS316L鋼、DIN1.4914鋼及び17Cr77Ni鋼の耐食性を温度約100~250°C, LiOH濃度1~10g/100ccH<sub>2</sub>Oの条件で測定したNETのデータをFig.3.4.36~Fig.3.4.48に示す<sup>(44)~(46)</sup>。これらのデータから各ステンレス鋼の不働態保持電流を求めてみると（Table3.4.5）と、不働態保持電流が温度及び水酸化リチウム濃度とともに増加することが分かる。実験に使用した試料の有効表面積に関する記述が無いSUS316L鋼及びDIN1.4914鋼については電流密度あたりの評価はできないが、単位面積あたりの電流値が報告されている17Cr77Niのデータを鉄の腐食速度に換算してみると $50\ \mu A/cm^2 = 125\text{mdd} = 0.58\text{mm/y}$ に相当する。なお、Fig.3.4.47とFig.3.4.48の比較より、ステンレス鋼中のニッケルが不働態保持電流を低下する効果（耐食性を向上する）を持つことが分かる<sup>(47)</sup>。

#### (2) 硝酸リチウム水溶液

高温、高濃度の硝酸リチウム水溶液とステンレス鋼との腐食に関するデータについても、NETの報告（Fig.3.4.49~Fig.3.4.57）が現時点でも最も有用と考えられる<sup>(45)~(46)</sup>。これらの図から読み取った不働態保持電流の値をTable3.4.6に示す。Table3.4.5との比較から明らかなように、硝酸リチウム水溶液の場合の不働態保持電流が水酸化リチウム水溶液の場合よりも小さく、ステンレス鋼が硝酸リチウム水溶液中でより安定であるといえる。しかし、温度250°Cでは両者の差異は小さくなっているようであり、より高温での優劣は不明である。

## 参考文献

- (1) 日本金属学会編：“金属便覧”，改訂4版 丸善（1982）
- (2) 日本金属学会・日本鉄鋼協会編：“鉄鋼材料便覧”，丸善（1967）
- (3) 長谷川正義編：“ステンレス鋼便覧”，日刊工業新聞社（1959）
- (4) 平 浩：“初步と実用のステンレス講座”，日本工業出版（1970）
- (5) Peckner,D., Bernstein,I.M.：“Handbook of Stainless Steels”，McGraw-Hill, Inc. (1977)
- (6) Harries,D.R., Dupouy,J.-M. : Proc. 13th Symp. on Fusion Technology, Ispra 1984, 147 (1984)
- (7) Pulham,R.J., Hubberstey,P., Chapman,R.A., Young,N. : J. Nucl. Mater., 155 - 157, 491 (1988)
- (8) Forcey,K.S., Ross,D.K., Simpson,J.C.B. : J. Nucl. Mater., 160, 117 (1988)
- (9) Wegst,C.W. : "Stahlschlüssel", Verlag StahlschlusseL1 Wegst GmbH (1983)
- (10) Wahll,M.J., Maykuth,D.J., Hucek,H.J. : MCIC - HB - 09 - Vol. 2 (1978)
- (11) Fontana, M.G. : "Corrosion Engineering", 3rd ed. McGraw-Hill, Inc. (1986)
- (12) 電気化学協会編：“電気化学便覧”，改訂4版，丸善（1985）
- (13) 杉本 克久：金属, 51, 6 (1981)
- (14) Bhatt,H.J., Phelps,E.H. : Corrosion, 17, 430t (1961)
- (15) Uhlig,H.H. : "Corrosion and Corrosion Control", 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc. (1971)
- (16) Asai,O., Kawashima,N. : Denki Kagaku, 34, 761 (1966)
- (17) Asai,O., Kawashima,N. : Proc. 4th Conf. on Metallic Corrosion, Amsterdam, NACE, 492 (1969)
- (18) Swandby,R.K. : Chem. Eng., 69, 186 (1962)
- (19) Sedriks,A.J. : "Corrosion of Stainless Steels", Jhon Wiley & Sons, Inc., (1979)
- (20) Macdonald,Digby D., Cagnolino,G. : Proc. Int. Symp. Environ. Degrad. Mater. Nucl. Power Syst. - Water React., 2nd 1985, 426 (1986)
- (21) Binder,W., Brown,C., Franks,R. : Trans. Amer. Soc. Metals, 41, 1301 (1949)
- (22) Hillner,E., Chirigos,J.N. : WAPD - TM - 307, (1962)
- (23) BIOOm,M.C., Smith,Somers H,Jr. : Proc. 25th Conf. NACE 1969, 276 (1970)
- (24) Williams,W., Eckel J. : J. Amer. Soc Nav. Engrs., 68, 93 (1956)
- (25) Uhlig,H., Triadis,D., Stern,M. : J. Electrochem. Soc., 102, 59 (1955)
- (26) Leckie,H., Uhlig,H. : J. Electrochem. Soc., 113, 1262 (1966)
- (27) 鈴木 紹夫, 北村義治：防食技術, 20, 165 (1971)
- (28) 三木貢治編：“鉄鋼腐食学”，朝倉書店, 234 (1972)
- (29) 幡野 佐一：“装置材料耐食表”，改訂増補，化学工業社, 58 (1972)
- (30) Uhlig,H.H. ed. : "Corrosion Handbook", Wiley, New York (1948)

- (31) 腐食防食協会編：“エロージョンとコロージョン”，裳華房，31 (1987)
- (32) Kuribayashi,M., Okabayashi,H. : 日本金属学会誌, 46, 170 (1982)
- (33) Jones,R.H. Wolfer,W.G. : J. Nuclear Materials, 122 & 123, 379 (1984)
- (34) Jones,R.H., Proc. 2nd Int. Symp. Environ. Degrad. Mater. Nucl. Power Syst. – Water React., 173 (1986)
- (35) Ishigure,K., Takagi,J., Takeuchi,Y., Fujita,N., Muroi,M. : Proc. 2nd Int. Symp. Environ. Degrad. Mater. Nucl. Power Syst. – Water React., 181 (1986)
- (36) Listler,D.H., McAlpine,E., McIntyer,N.S. : Water Chem. React. Syst. 3, 2, 69 (1984)
- (37) Copson,H.R., Berry,W.E. : Corrosion – NACE, 18, 21t (1962)
- (38) Krieg,A. : YAEC – 116, (1959)
- (39) Whyte,D.D., Taylor,G.R. : WCAP – 3725,(1964)
- (40) Miller,D.A., Bryant,P.E.C. : Proc. 26th Conference, NACE, 292 (1970)
- (41) Hirano,H., Kurosawa.T. : Boshoku Gijutsu, 34, 92 (1985)
- (42) Copson, H.R., Dean, S.W. : Corrosion – NACE, 21, 1 (1965)
- (43) Iyoki,S., Uemura.T. : Reitou (Refrigeration), 55, 71 (1980)
- (44) Bogaerts,W.F., Embrechts,M.J., Deutsch., Gierszewski,P. : Fusion Technology 10, 995 (1986)
- (45) Waaben,R., Bogaerts,W., Embrechts,M. : Proc. 12th Symp. on Fusion Engineering Monterey 1987, 1332 (1987)
- (46) Bogaerts,W.F., Embrechts,M.J., Waaben,R. : NET Report EUR – FU/XII – 80/87/75, (1987)
- (47) Besnard,A., Coriou,H., Grass,L., Pinard – Legry,G. : Int. Conf. Series, High Temperature High Pressure Electrochemical Aqueous Solutions, NACE 4, 508 (1976)
- (48) 伊藤悟郎：“腐食科学と防食技術”，コロナ社 (1969)

Table 3.4.1 (1), (9)

種類の記号	化 学 成 分 (%)										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	その他の
オーステナイト系											
SUS 201	0.15 以下	1.00 以下	5.50 ~7.50	0.060 以下	0.030 以下	3.50 ~5.50	16.00 ~18.00	—	—	0.25 以下	—
SUS 202	0.15 以下	1.00 以下	7.50~ 10.00	0.060 以下	0.030 以下	4.00 ~6.00	17.00 ~19.00	—	—	0.25 以下	—
SUS 301	0.15 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	6.00 ~8.00	16.00 ~18.00	—	—	—	—
SUS 302	0.15 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.00 ~10.00	17.00 ~19.00	—	—	—	—
SUS 303	0.15 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.20 以下	0.15 以上	8.00 ~10.00	17.00 ~19.00	(1)	—	—	—
SUS 303 Se	0.15 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.20 以下	0.060 以下	8.00 ~10.00	17.00 ~19.00	—	—	—	Se 0.15 以上
SUS 304	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.00 ~10.50	18.00 ~20.00	—	—	—	—
SUS 304 L	0.030 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	9.00 ~13.00	18.00 ~20.00	—	—	—	—
SUS 304 N 1	0.08 以下	1.00 以下	2.50 以下	0.045 以下	0.030 以下	7.00 ~10.50	18.00 ~20.00	—	—	0.10 ~0.25	—
SUS 304 N 2	0.08 以下	1.00 以下	2.50 以下	0.045 以下	0.030 以下	7.50 ~10.50	18.00 ~20.00	—	—	0.15 ~0.30	Nb 0.15 以下
SUS 304 LN	0.030 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.50 ~11.50	17.00 ~19.00	—	—	0.12 ~0.22	—
SUS 305	0.12 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	10.50 ~13.00	17.00 ~19.00	—	—	—	—
SUS 309 S	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	12.00 ~15.00	22.00 ~24.00	—	—	—	—
SUS 310 S	0.08 以下	1.50 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	19.00 ~22.00	24.00 ~26.00	—	—	—	—
SUS 316	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	10.00 ~14.00	16.00 ~18.00	2.00 ~3.00	—	—	—
SUS 316 L	0.030 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	12.00 ~15.00	16.00 ~18.00	2.00 ~3.00	—	—	—
SUS 316 N	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	10.00 ~14.00	16.00 ~18.00	2.00 ~3.00	—	0.10 ~0.22	—
SUS 316 LN	0.030 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	10.50 ~14.50	16.50 ~18.50	2.00 ~3.00	—	0.12 ~0.22	—
SUS 316 J 1	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	10.00 ~14.00	17.00 ~19.00	1.20 ~2.75	1.00 ~2.50	—	—
SUS 316 J 1 L	0.030 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	12.00 ~16.00	17.00 ~19.00	1.20 ~2.75	1.00 ~2.50	—	—
SUS 317	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	11.00 ~15.00	18.00 ~20.00	3.00 ~4.00	—	—	—
SUS 317 L	0.030 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	11.00 ~15.00	18.00 ~20.00	3.00 ~4.00	—	—	—
SUS 317 J 1	0.040 以下	1.00 以下	2.50 以下	0.045 以下	0.030 以下	15.00 ~17.00	16.00 ~19.00	4.00 ~6.00	—	—	—
SUS 321	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	9.00 ~13.00	17.00 ~19.00	—	—	—	Ti 5×C% 以下
SUS 347	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	9.00 ~13.00	17.00 ~19.00	—	—	—	Nb × C% 以下
SUS XM 7	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.50 ~10.50	17.00 ~19.00	—	3.00 ~4.00	—	—
SUS XM 15 J 1	0.08 以下	3.00 ~5.00	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	11.50 ~15.00	15.00 ~20.00	—	—	—	—
オーステナイト-フェライト系											
SUS 329 J 1	0.08 以下	1.00 以下	1.50 以下	0.040 以下	0.030 以下	3.00 ~6.00	23.00 ~28.00	1.00 ~3.00	—	—	—

Table 3.4.1 (Continued)

種類	化 学 成 分 (%)										
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	その他の
フェライト系											
SUS 405	0.08 以下	1.00 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下		11.50 ~14.50	—	—	—	Al 0.10~0.30
SUS 410 L	0.030 以下	1.00 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下		11.00 ~13.50	—	—	—	—
SUS 430	0.12 以下	0.75 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下		16.00 ~18.00	—	—	—	—
SUS 430 F	0.12 以下	1.00 以下	1.25 以下	0.060 以下	0.15 以上		16.00 ~18.00	(1)	—	—	—
SUS 434	0.12 以下	1.00 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下		16.00 ~18.00	0.75 ~1.25	—	—	—
SUS 447 J1	0.010 以下	0.40 以下	0.40 以下	0.030 以下	0.020 以下		28.50 ~32.00	1.50 ~2.50	—	0.015 以下	—
SUS XM 27	0.010 以下	0.40 以下	0.40 以下	0.030 以下	0.020 以下		25.00 ~27.50	0.75 ~1.50	—	0.015 以下	—
マルテンサイト系											
SUS 403	0.15 以下	0.50 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	(2)	11.50 ~13.00	—	—	—	—
SUS 410	0.15 以下	1.00 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	(2)	11.50 ~13.50	—	—	—	—
SUS 410 J1	0.08 ~0.18	0.60 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	(2)	11.50 ~14.00	0.30 ~0.60	—	—	—
SUS 416	0.15 以下	1.00 以下	1.25 以下	0.060 以下	0.15 以上	(2)	12.00 ~14.00	(3)	—	—	—
SUS 420 J1	0.16 ~0.25	1.00 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	(2)	12.00 ~14.00	—	—	—	—
SUS 420 J2	0.25 ~0.40	1.00 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	(2)	12.00 ~14.00	—	—	—	—
SUS 420 F	0.26 ~0.40	1.00 以下	1.25 以下	0.060 以下	0.15 以上	(2)	12.00 ~14.00	(3)	—	—	—
SUS 431	0.20 以下	1.00 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	1.25 以下	15.00 ~17.00	—	—	—	—
SUS 440 A	0.60 ~0.75	1.00 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	(2)	16.00 ~18.00	(4)	—	—	—
SUS 440 B	0.75 ~0.95	1.00 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	(2)	16.00 ~18.00	(4)	—	—	—
SUS 440 C	0.95 ~1.20	1.00 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	(2)	16.00 ~18.00	(4)	—	—	—
SUS 440 F	0.95 ~1.20	1.00 以下	1.25 以下	0.060 以下	0.15 以上	(2)	16.00 ~18.00	(4)	—	—	—
析出硬化系											
SUS 630	0.07 以下	1.00 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	3.00 ~5.00	15.50 ~17.50	—	3.00 ~5.00	—	Nb 0.15~0.45
SUS 631	0.09 以下	1.00 以下	1.00 以下	0.040 以下	0.030 以下	6.50 ~7.75	16.00 ~18.00	—	—	—	Al 0.75~15.0

(備考) 1. SUS XM 15 J1 および SUS 329 J1 については、必要に応じて表記以外の合金元素を添加することができる。

2. SUS 447 J1 および SUS XM 27 以外は Ni 0.50% 以下を含有しても差し支えない。

3. SUS 447 J1 および SUS XM 27 は Ni 0.50% 以下、Cu 0.20% 以下および Ni+Cu 0.50% 以下を含有しても差し支えない。また必要に応じて表記以外の合金元素を添加することができる。

(注) (1) Mo は 0.60% 以下を添加することができる。 (2) Ni は 0.60% 以下含有しても差し支えない。

(3) Mo は 0.50% 以下を添加することができる。 (4) Mo は 0.75% 以下を添加することができる。

Standard
Nn
1.4914

Analysis											Analysis				Composition			
C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Mo	Ni	V	W	Al	Cu	Fe	Ti	Sonstige Aulres - Others			
%	%	%	≤%	≤%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%			
0.11~0.19	0.15~0.65	0.20~1.25	0.030	0.025					10.0~12.0	0.40~1.00	0.50~1.20	8.10~0.70				Nb 0.10~0.50; Mn 0.03~0.09		

Table 3.4.2 腐食速度換算表

腐食度	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	mdd	$\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$
$1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	1	$8.64 \times 10^9$		$3.60 \times 10^7$
1 mdd	$1.157 \times 10^{-10}$	1		$4.17 \times 10^{-3}$
$1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	$2.78 \times 10^{-6}$	$2.40 \times 10^2$	1	
$10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	$2.89 \times 10^{-9}$	25.0	0.104	

mdd = mg/dm<sup>2</sup>/day.

侵食度	mm/yr	mpy	ipy	$\mu\text{m}/\text{h}$	m/s
1 mm/yr	1	$3.94 \times 10$	$3.94 \times 10^{-2}$	$1.142 \times 10^{-4}$	$3.17 \times 10^{-11}$
1 mpy	$2.54 \times 10^{-2}$	1	$10^{-3}$	$2.90 \times 10^{-3}$	$8.05 \times 10^{-13}$
1 ipy	$2.54 \times 10$	$10^3$	1	2.90	$8.05 \times 10^{-10}$
$1 \mu\text{m}/\text{h}$	8.76	$3.45 \times 10^2$	$3.45 \times 10^{-1}$	1	$2.78 \times 10^{-10}$
1 m/s	$3.15 \times 10^{10}$	$1.24 \times 10^{12}$	$1.24 \times 10^9$	$3.60 \times 10^9$	1
$10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.116	4.57	0.457	$1.32 \times 10^{-2}$	$3.68 \times 10^{-12}$

1 mpy = 1 mil (=  $10^{-3}$  inch =  $25.4 \mu\text{m}$ ) per year.1 ipy = 1 inch (=  $25.4 \text{ mm}$ ) per year.

$$\text{腐食度 } \dot{W} = \frac{\Delta W}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\Delta S} = \frac{M_t}{n_i F} \cdot I$$

$$\text{侵食度 } \dot{L} = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{1}{\rho_i} \cdot \dot{W} = \frac{1}{\rho_i} \cdot \frac{M_t}{n_i F} \cdot I$$

ここに,  $\Delta W$ : 重量減,  $\Delta L$ : 侵食深さ,  $\Delta t$ : 試験時間,  $\Delta S$ : 試片表面積,  $M_t$ ,  $n_i$  および  $\rho_i$  : それぞれ i 種金属の原子量, 以及電荷数および密度,  $F$ : ファラデー定数,  $I$ : 通食電流密度,

Table 3.4.3 Representative corrosion rate of mild steel in alkalin hydroxide solutions containing lithium hydroxide at 300°C (mg/dm<sup>2</sup> month)<sup>(17)</sup>

Concentration of Alkaline Hydroxide (N)	Concentration of LiOH (N)		
	0	0.05	0.25
NaOH	0	40	123
	0.5	300	161
	1	410	379
	2.5	720	440
	5	1,480	1,040
KOH	0	40	128
	0.5	650	580
	1	1,500	740
	2.5	4,000	1,330
	5	10,000	4,300
RbOH	0	40	128
	0.5	500	500
	1	1,500	1,130
	2.5	6,000	4,600
	5	15,000	20,000
CsOH	0	40	128
	0.5	850	490
	1	1,900	1,680
	2.5	8,000	9,250
	5	17,000	14,200

Table 3.4.4 Effect of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> addition on SCC<sup>(35)</sup>

O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	γ-rays(R/hr)	ε <sub>f</sub> (%)	σmax(Kg/mm <sup>2</sup> )
≤20ppb	* 10ppm (maximum)	0 4x10 <sup>4</sup>	33.3% 38.4	34.8 34.3
8ppm	0	0 4x10 <sup>4</sup>	16.5 10.8	30.6 22.3

T: 250°C, ε: 8.3x10<sup>-7</sup> s<sup>-1</sup>

\* see

Table 3.4.5 LiOH水溶液における代表的ステンレス鋼の不働体保持電流<sup>(45),(46)</sup>

材料	LiOH濃度	温度°C	不動態保持電流
sus 304	5 wt%	270	0.2-0.4 mA
SUS 316	1 wt%	95	0.03-0.06 mA
SUS 316	9 wt%	95	0.2-0.4 mA
SUS 316	1 wt%	250	0.1, 0.6 mA
SUS 316	9 wt%	250	0.2, 1 mA
1.4914	1 wt%	95	0.015, 0.1 mA
1.4914	9 wt%	95	0.1-0.3 mA
1.4914	1 wt%	250	1 mA
1.4914	9 wt%	250	0.2-0.5 mA
17Cr77Ni	0.1 m (0.24 wt%)	250	5-10, 50 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

Table 3.4.6 硝酸水溶液における代表的ステンレス鋼の不働体保持電流<sup>(45),(46)</sup>

材料	LiNO <sub>3</sub> 濃度	温度°C	不動態保持電流 mA
SUS 316	3 wt%	95	0.015-0.02
SUS 316	23 wt%	95	0.02
SUS 316	3 wt%	250	0.03, 0.07
SUS 316	23 wt%	250	0.3
1.4914	3 wt%	95	0.003-0.007
1.4914	23 wt%	95	0.004-0.007
1.4914	3 wt%	250	0.03-0.05
1.4914	23 wt%	250	0.07

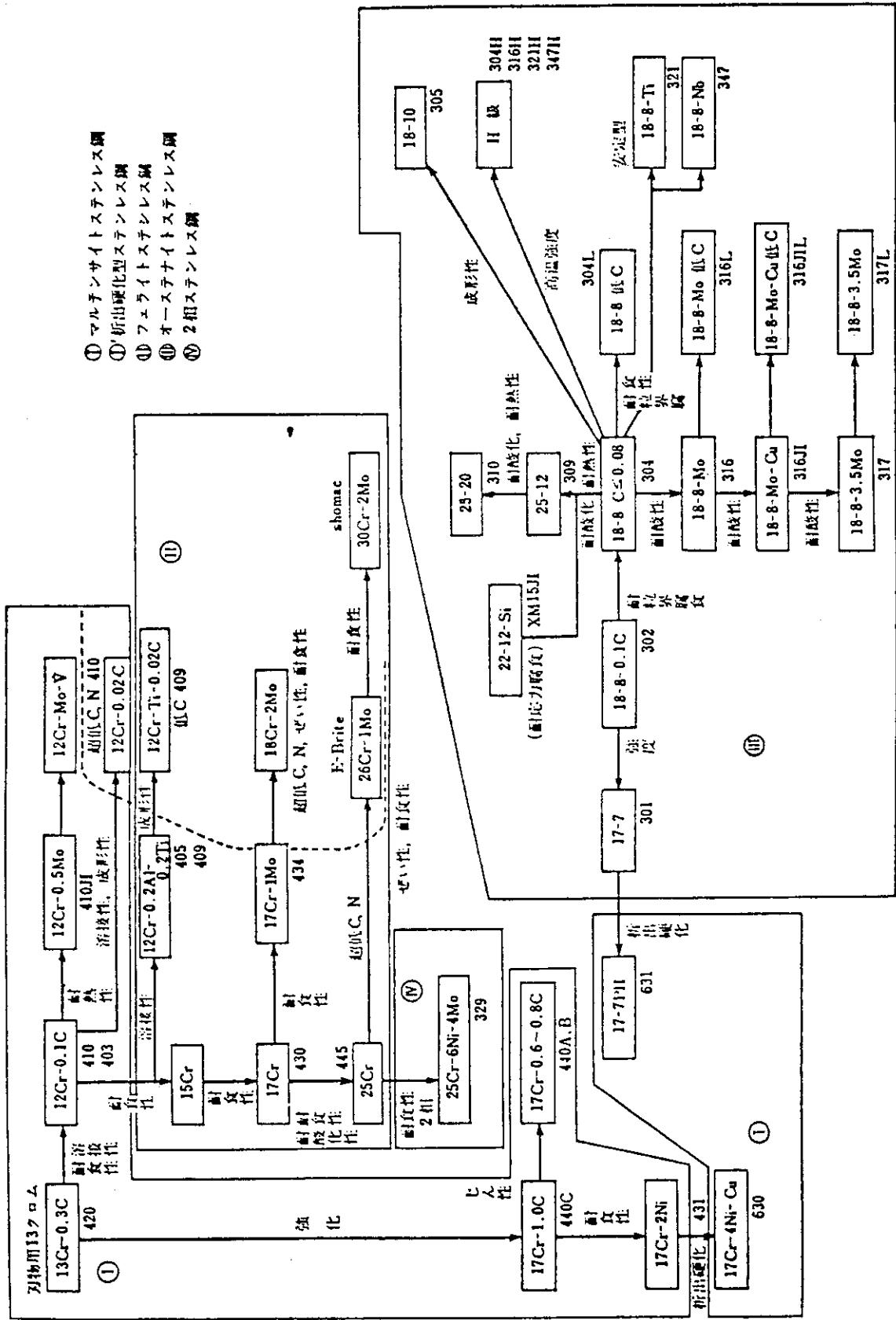
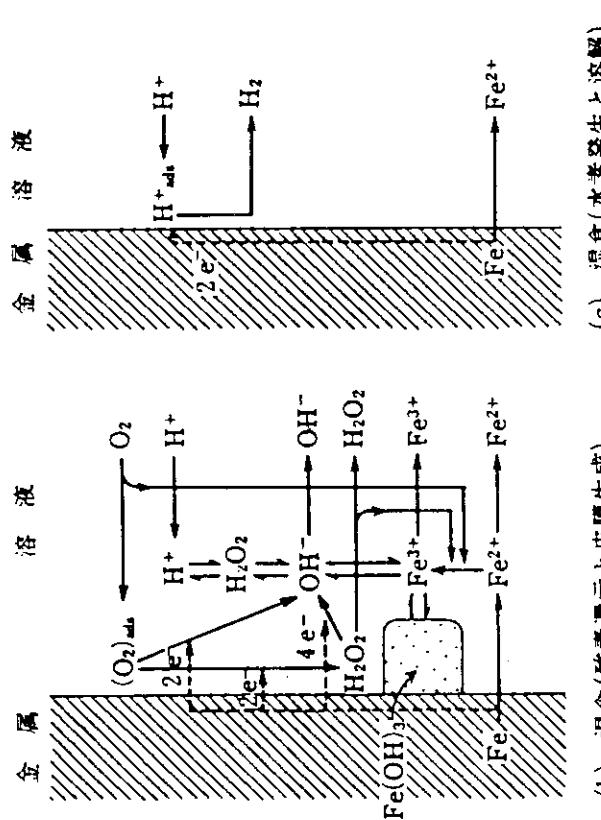
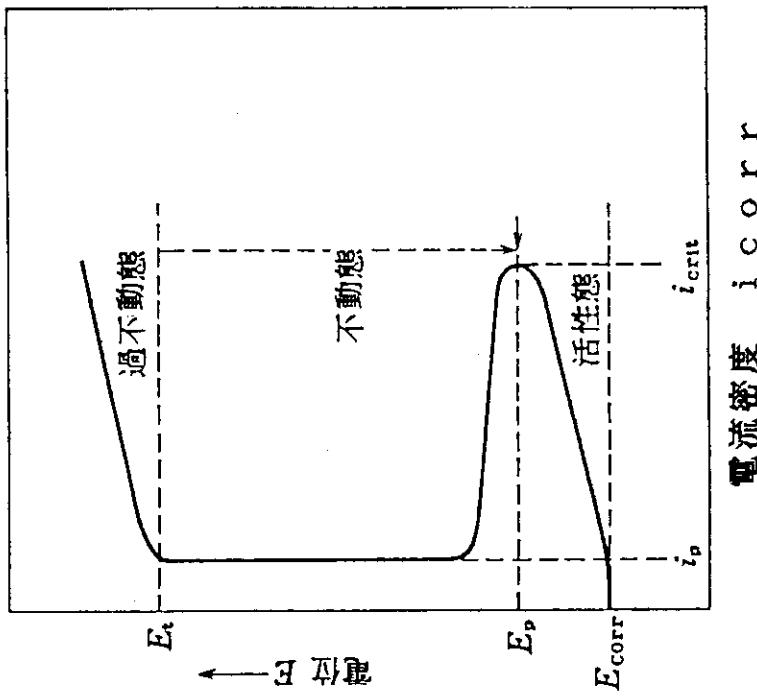


Fig. 3.4.1 ステンレス鋼の発展経過 (1)



(c) 湿食(水素発生と溶解)

Fig. 3.4.2 電解質水溶液中の電気化学的腐食のメカニズム<sup>(12)</sup>Fig. 3.4.3 鉄合金における不働態形成のメカニズム<sup>(31)</sup>

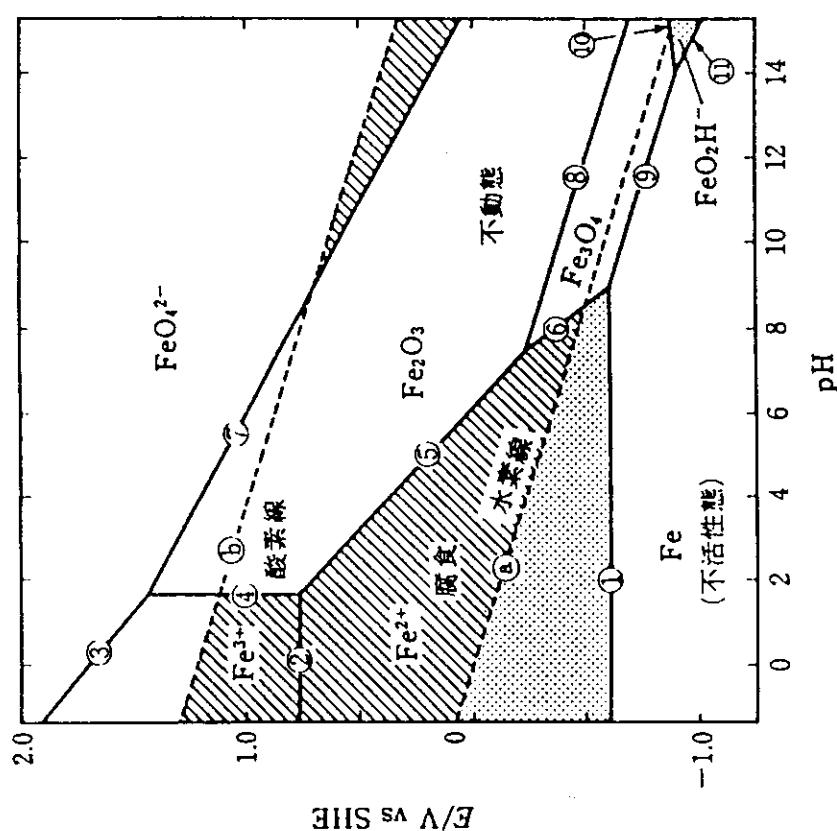
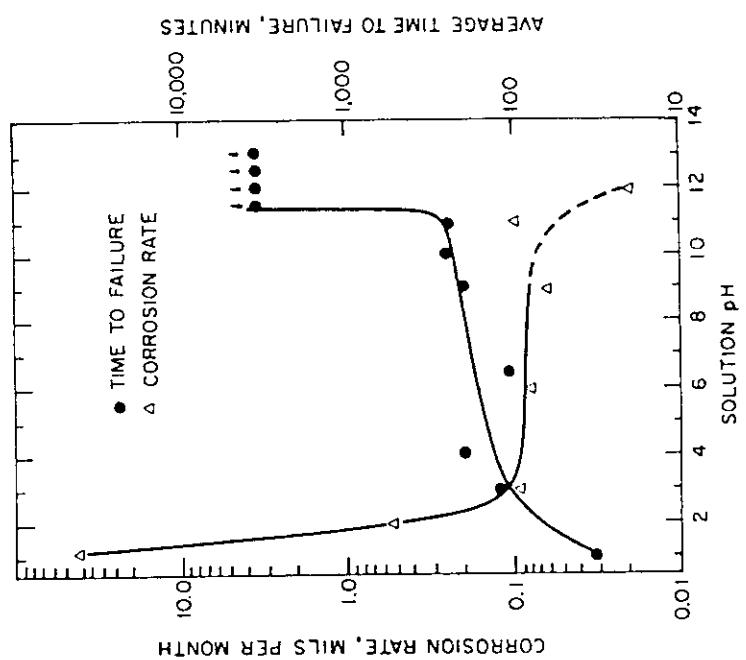
Fig. 3.4.4 Fe - H<sub>2</sub>O 系の電位 - pH 図<sup>(12)</sup>

Fig. 3.4.5 Effect of pH on the time to failure and initial corrosion rate of USS 12MoV stainless steel in an oxygenated 3% sodium chloride solution.<sup>(14)</sup>

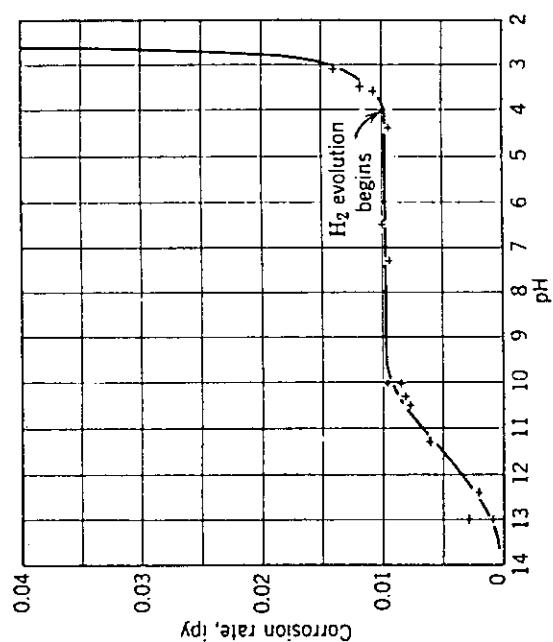


Fig. 3.4.6 Effect of pH on corrosion of iron in aerated soft water, room temperature (15)

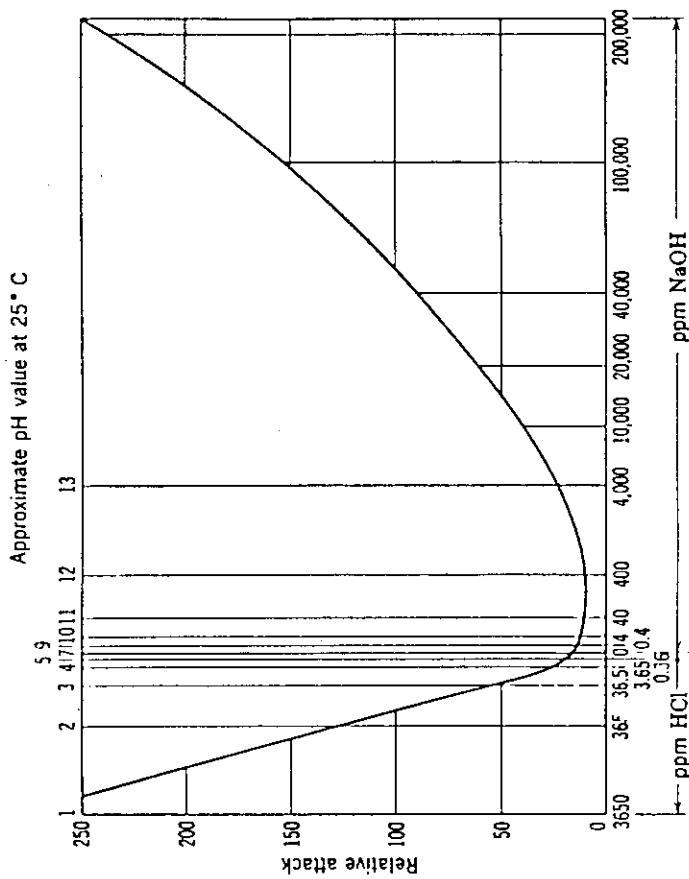


Fig. 3.4.7 Corrosion of iron by water at 310°C (590°F) at various values of pH measured at 25°C (15)

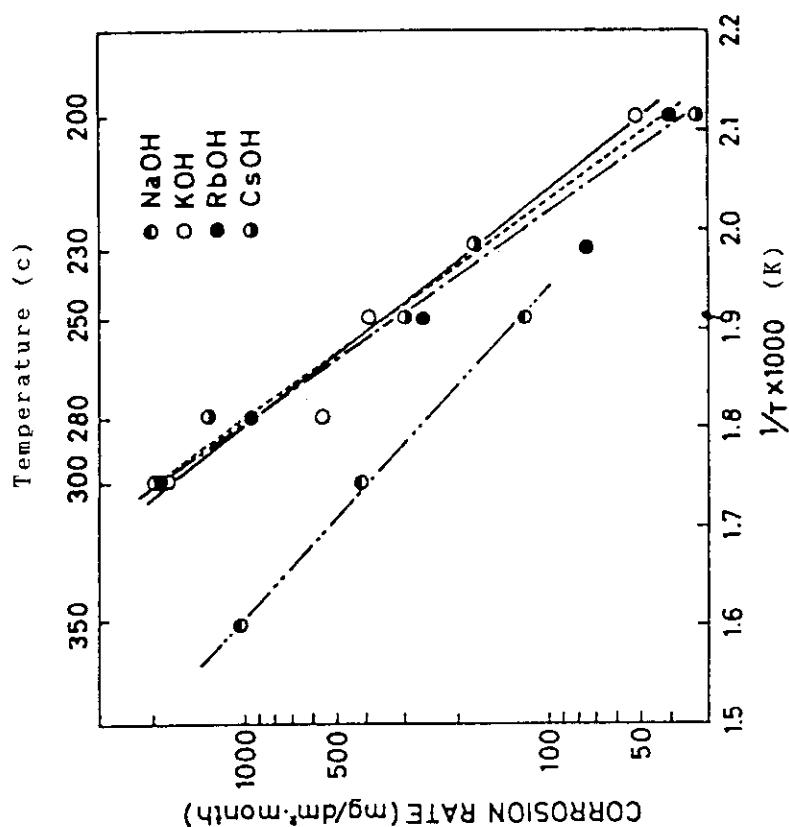


Fig. 3.4.9 Variation with reciprocal absolute temperature of representative corrosion rates (17)

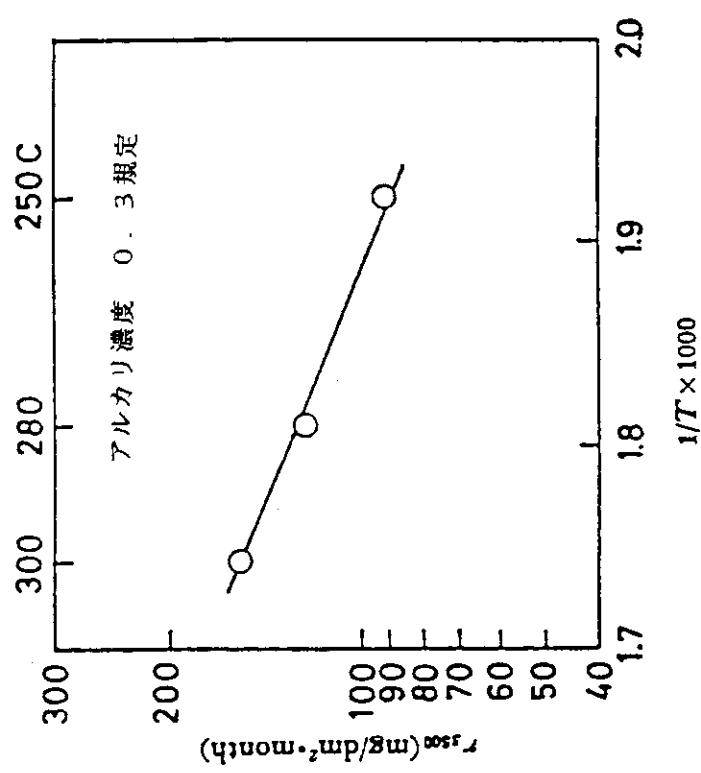


Fig. 3.4.8 水酸化アルカリ水溶液中の軟鉄の腐食速度の温度依存性<sup>(16)</sup>

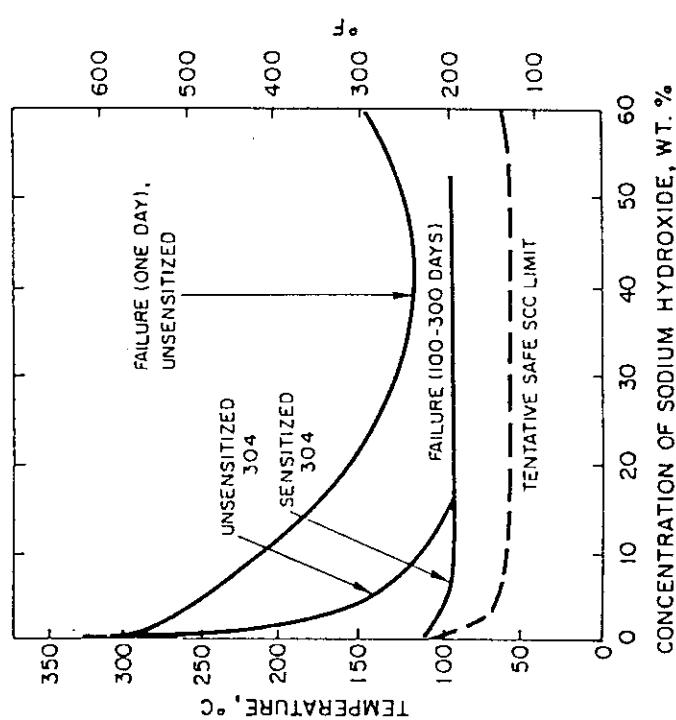


Fig. 3.4.10 Isocorrosion chart for type 304 and 316 stainless steels in sodium hydroxide (18)

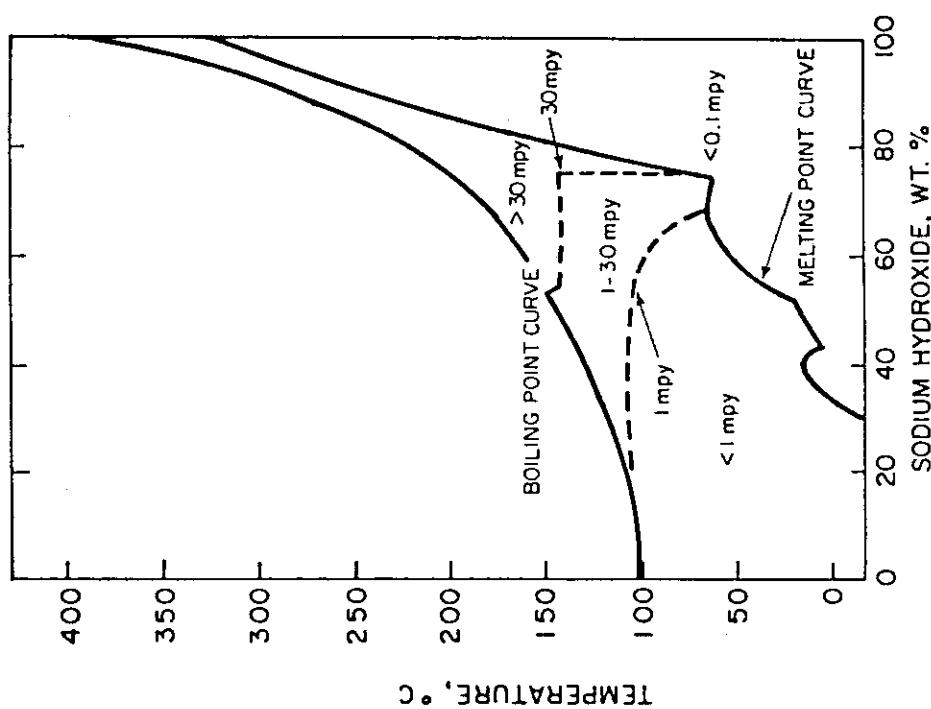


Fig. 3.4.11 Temperature and concentration limits for caustic cracking of type 304, 316, and 321 stainless steels (19)

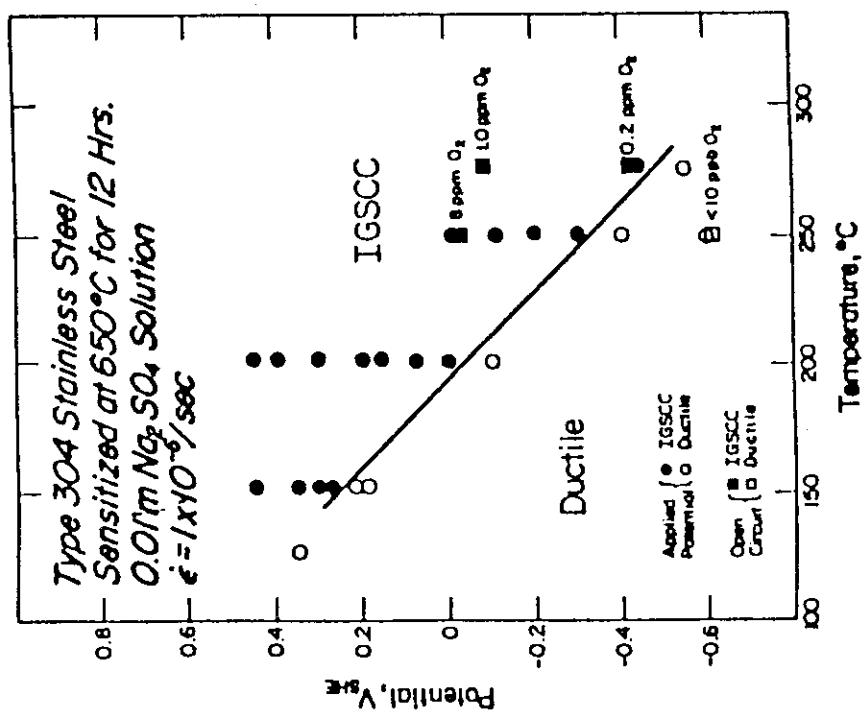


Fig. 3.4.13 Potential-temperature diagram showing domains of IGSCC and ductile failure (20)

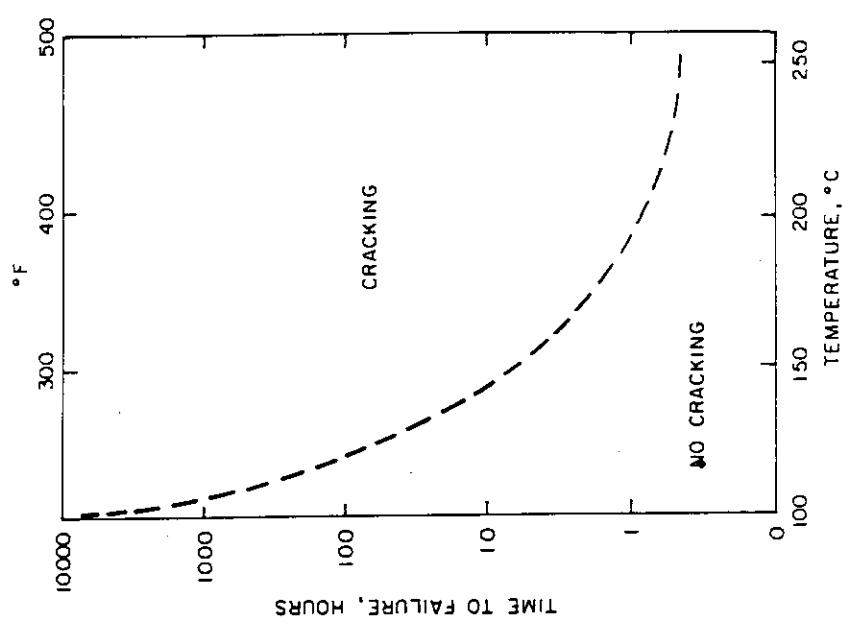


Fig. 3.4.12 Effect of temperature on the chloride cracking resistance of type 304 and 347 stainless steels in 0.1-0.33% sodium chloride containing oxygen (19)

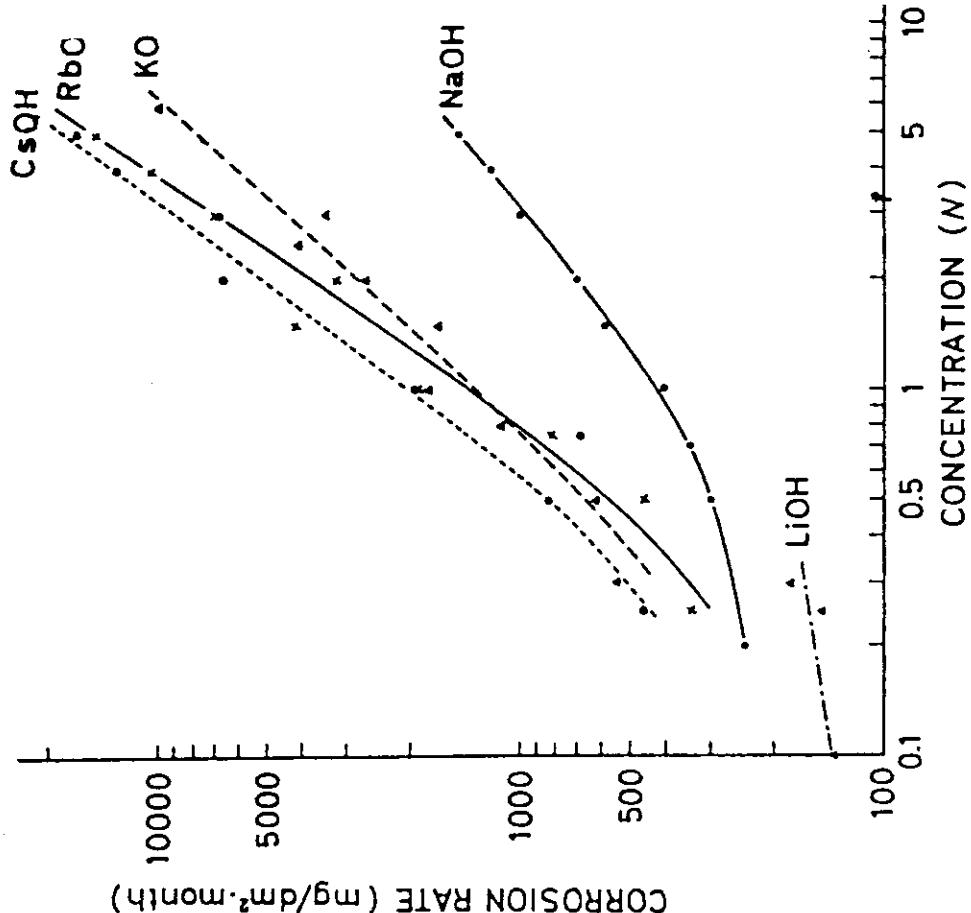


Fig. 3.4.15 Representative corrosion rates of mild steel in alkaline hydroxide solution at 300°C (17)

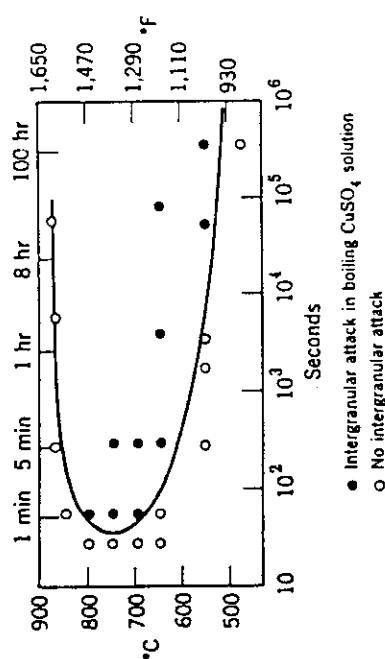


Fig. 3.4.14 Effect of time and temperature on sensitization of 18.2%Cr, 11.0%Ni, 0.05%N, 0.55%N stainless steel (21)

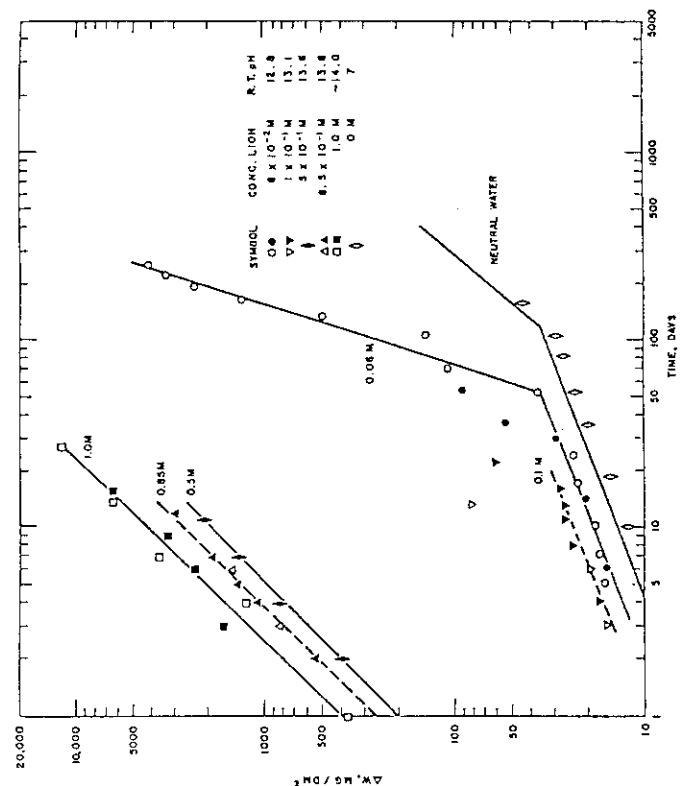


Fig. 3.4.17 Zircaloy weight gain in concentrated lithium hydroxide solutions-680°F-,  
Static autoclaves (22)

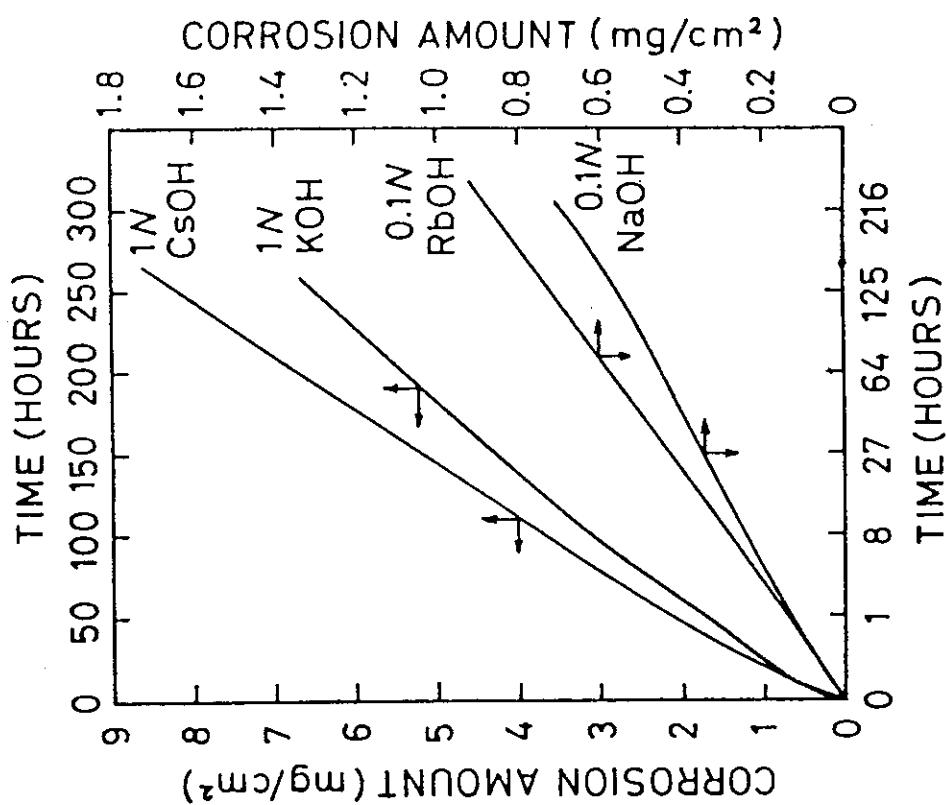


Fig. 3.4.16 Corrosion volume of mild steel  
in alkalin hydroxide solutions  
at 300°C (17)

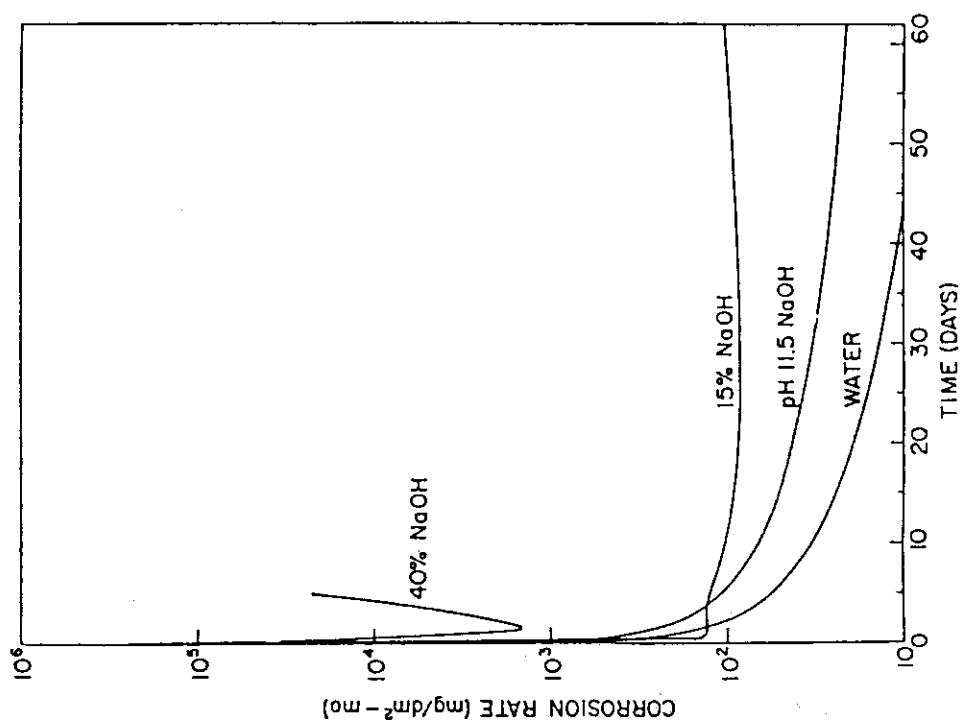


Fig. 3.4.18 Corrosion rate as a function of time for the reaction of mild steel with water and with NaOH solutions at  $316^{\circ}\text{C}$  (23)

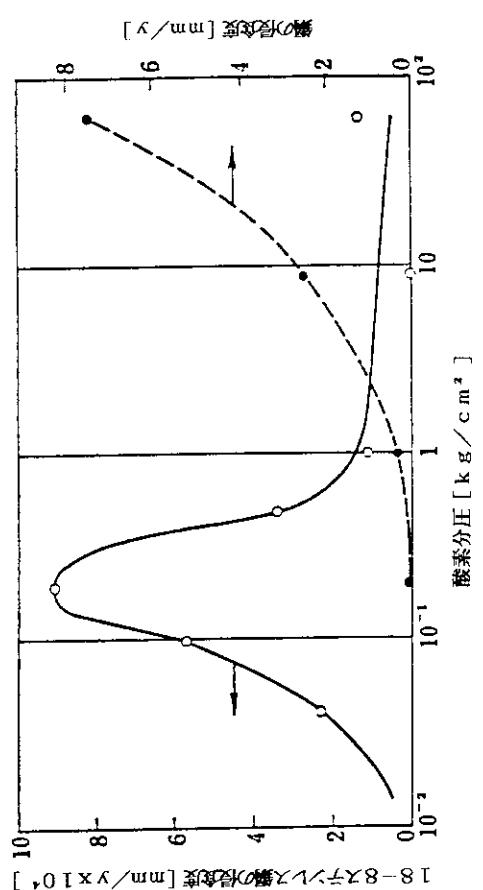


Fig. 3.4.19 食塩水中での 18-8 ステンレス鋼の腐食速度に及ぼす溶存酸素量の影響  
または鋼の腐食に及ぼす溶存酸素量の影響 (48)

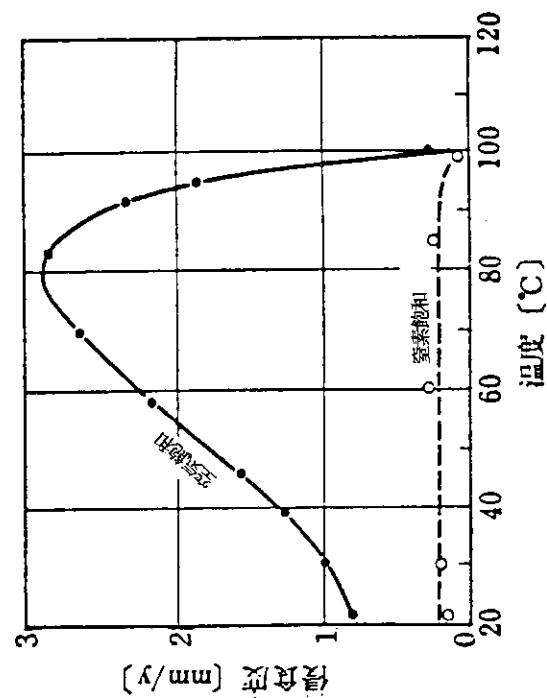


Fig. 3. 4.21 5 % 硫酸中のモネルの腐食に及ぼす温度の影響 (流速 8 cm/s)<sup>(48)</sup>

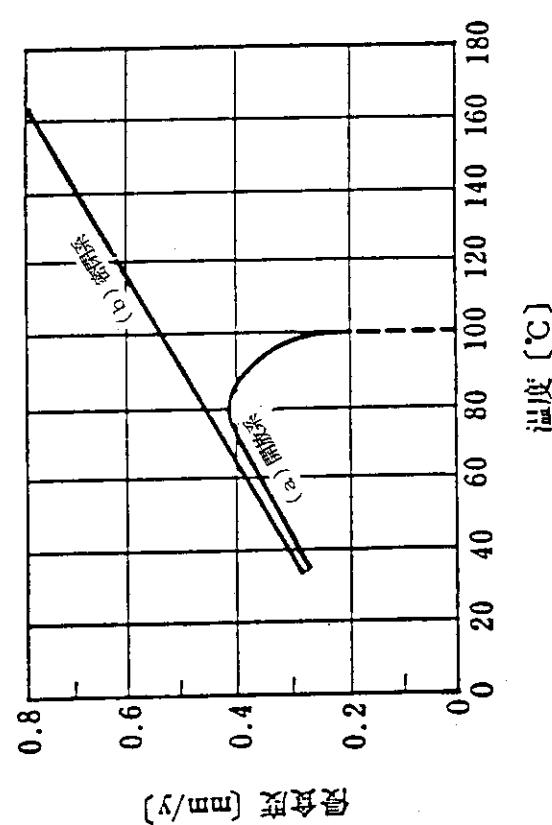


Fig. 3. 4.20 溶存酸素量による Fe の腐食速度に及ぼす温度の影響<sup>(48)</sup>

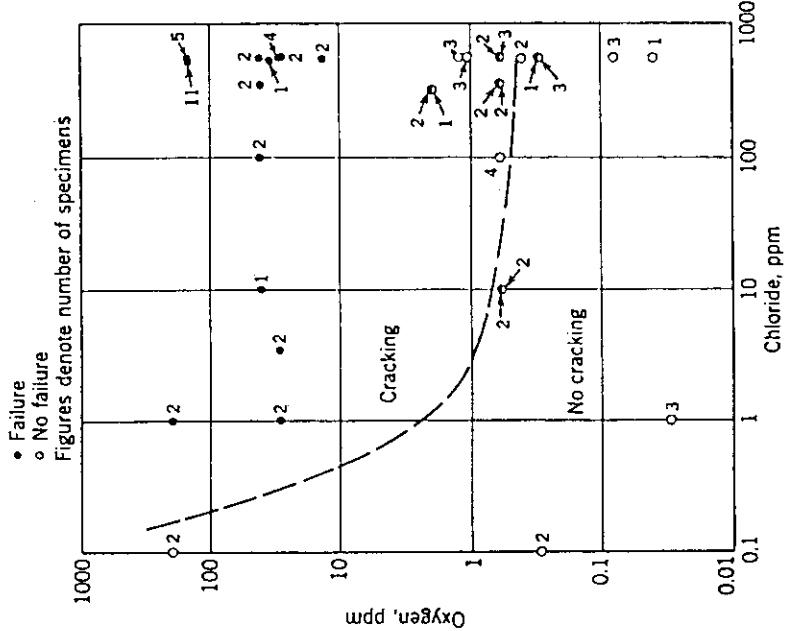


Fig. 3.4.23 Relation between chloride and oxygen content of boiler water on stress corrosion cracking of austenitic 18-8 type stainless steels exposed to steam phase with intermittent wetting; pH 10.6, 50 ppm  $\text{PO}_4^{2-}$ , 242 to 260°C (467-500°F), 1 to 30 days<sup>1</sup> exposure. (25)

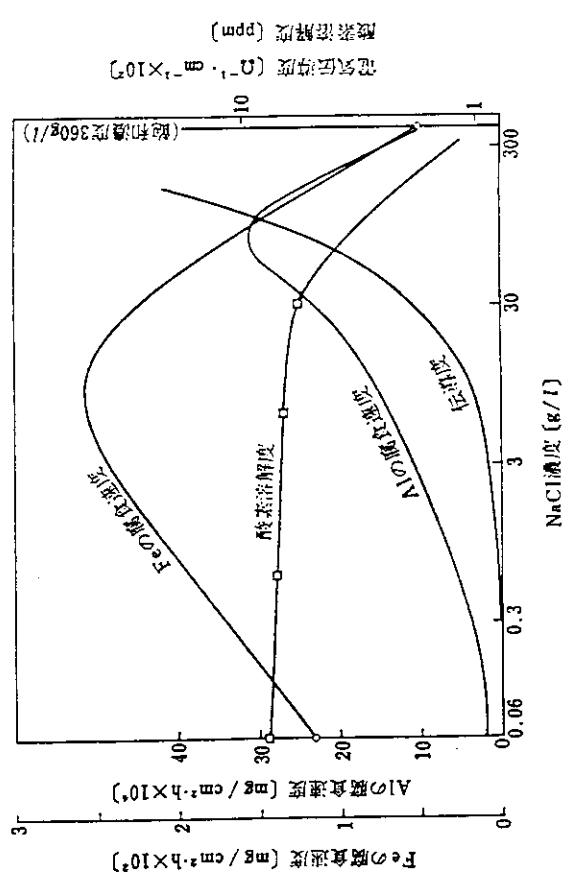


Fig. 3.4.22 NaCl 濃度が Fe または Al の腐食速度に及ぼす影響<sup>(48)</sup>

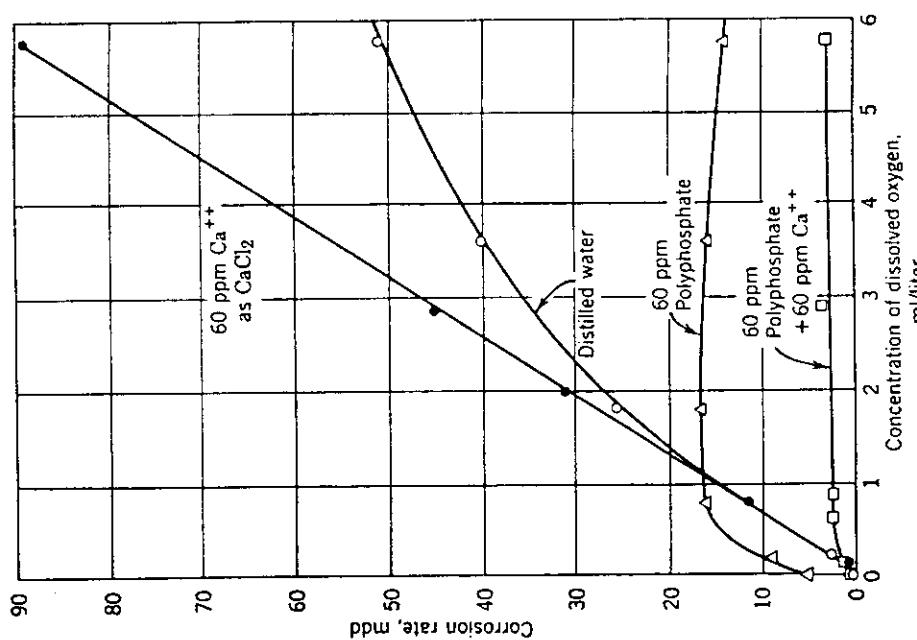


Fig. 3.4.24 Effect of oxygen concentration on sodium polyphosphate as a corrosion inhibitor of iron showing beneficial effect of dissolved  $O_2$  and  $Ca^{++}$ , 48-hr test, 25°C. (25)

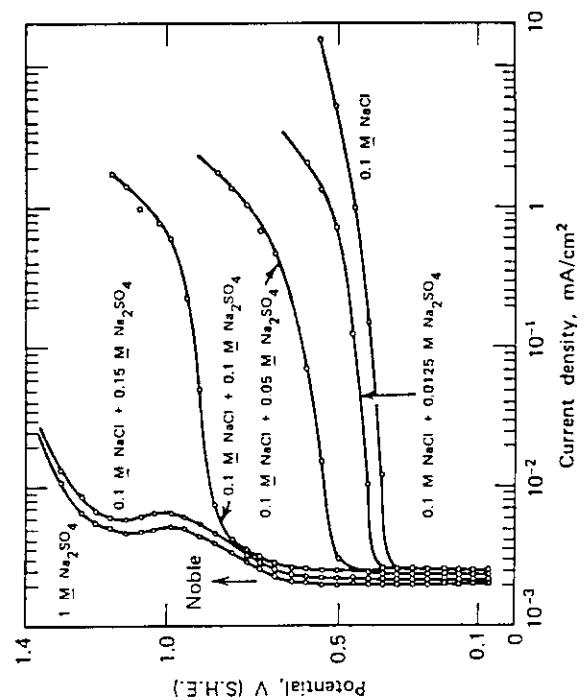


Fig. 3.4.25 Potentiostatic polarization curves for 18-8 stainless steel in 0.1M NaCl showing increasingly noble values of the critical potential with additions of  $Na_2SO_4$ , 25°C. (26)

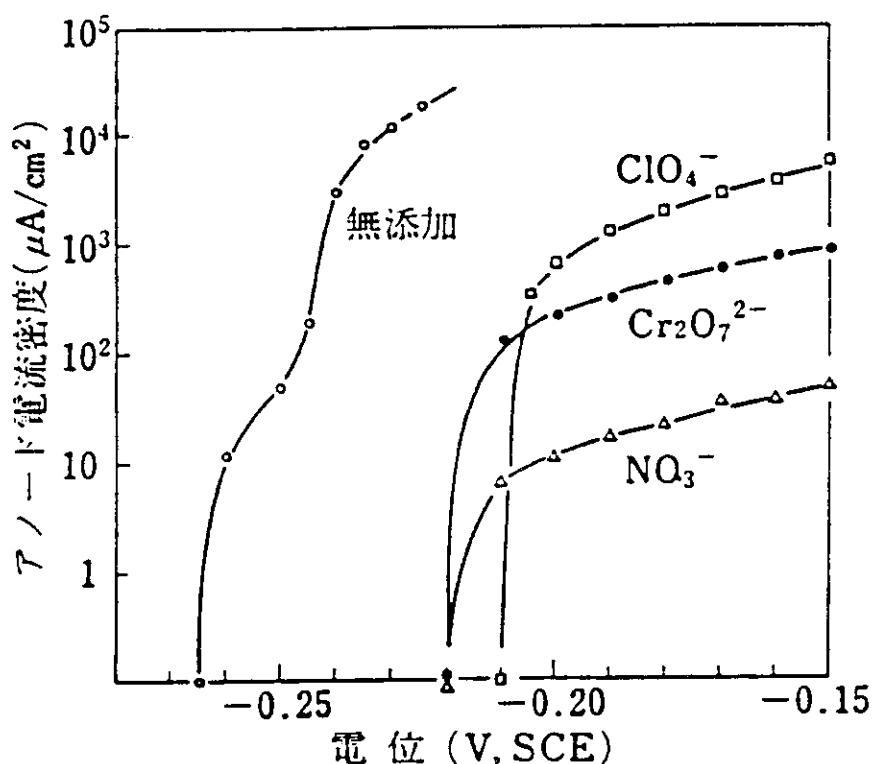


Fig. 3.4.26 ピットアノード溶解に及ぼす酸化性アニオンの影響  
(SUS 316 L, 0.5 N NaCl + 0.5 N 塩, 70 °C)<sup>(27)</sup>

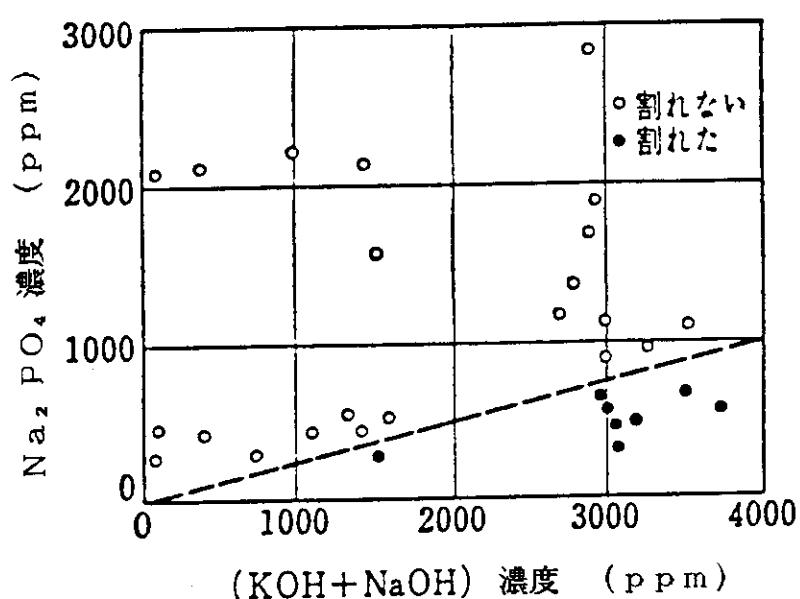
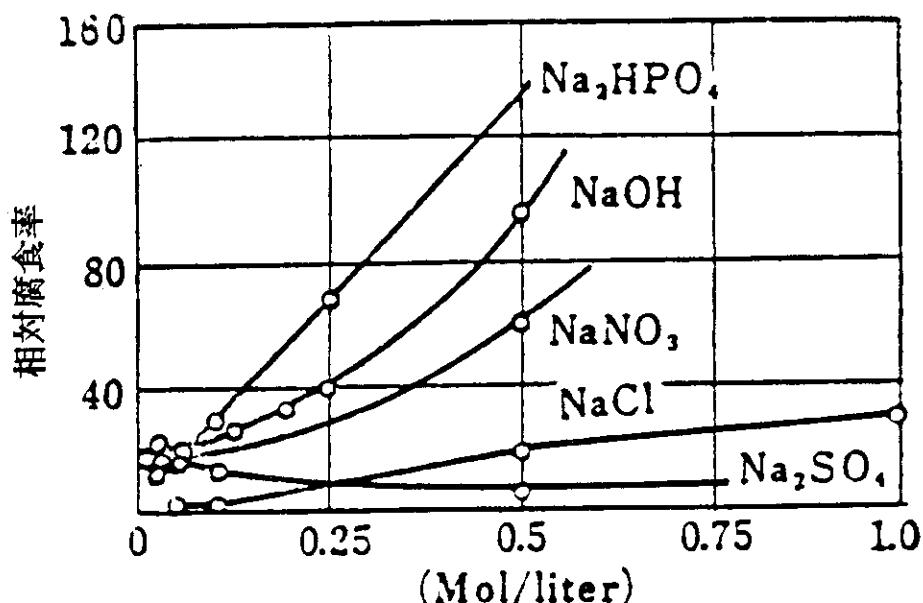
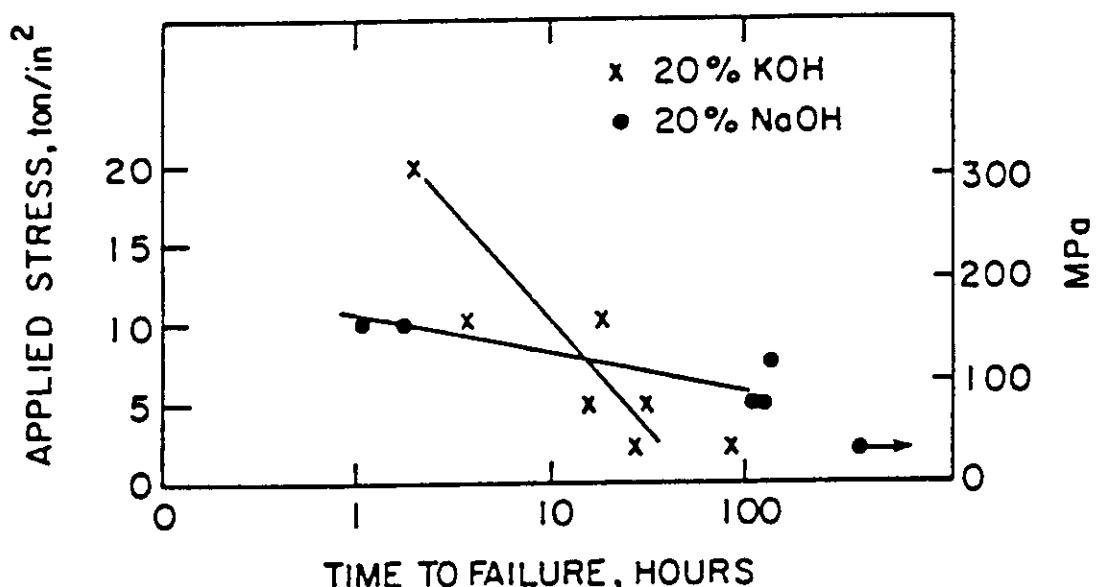
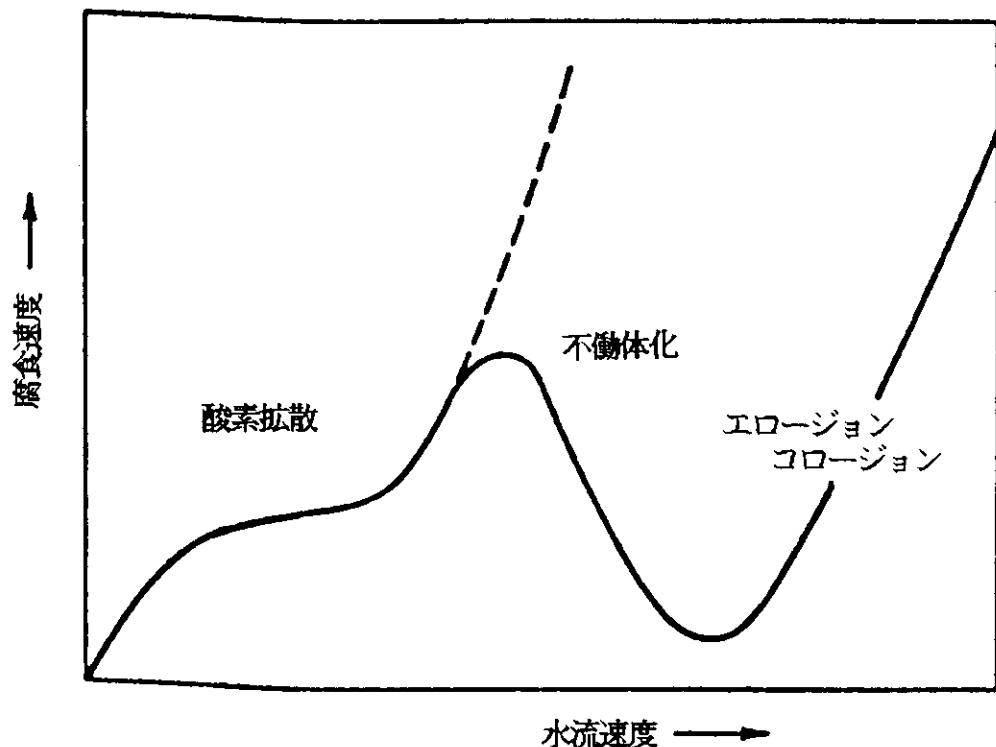
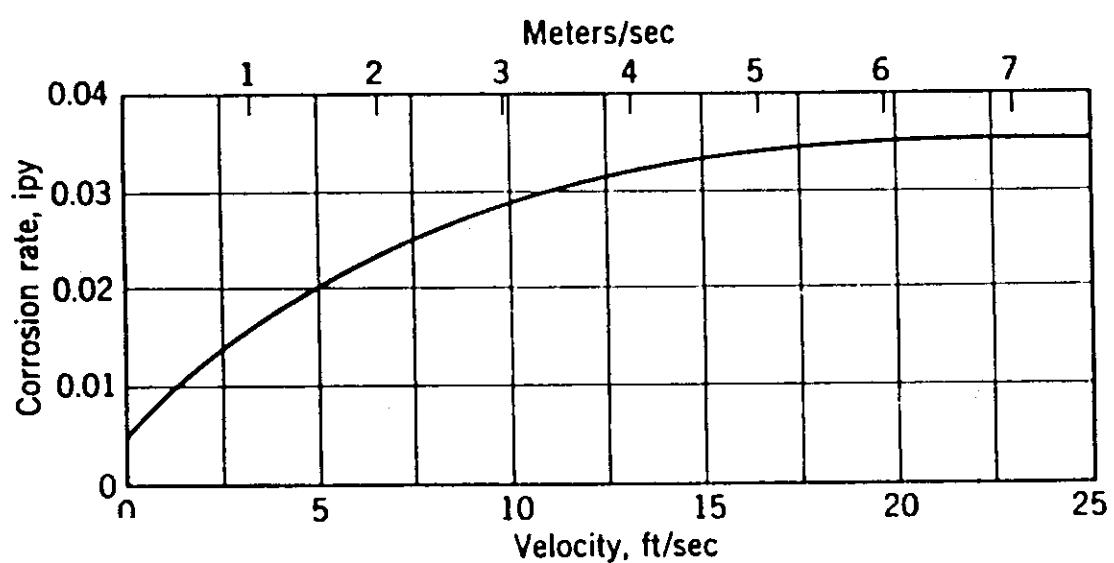


Fig. 3.4.27 18 Cr-10 Ni-Nb-Taステンレス鋼のアルカリ脆性に及ぼす  
Na<sub>2</sub>CO<sub>4</sub> の影響<sup>(28)</sup>

Fig. 3.4.28 310 °C, 各種塩溶液による鉄の腐食<sup>(29)</sup>Fig. 3.4.29 Effect of applied stress on the time to failure of type 347 stainless steel in oxygenated sodium hydroxide and potassium hydroxide solutions at 300°C.<sup>(19)</sup>

Fig. 3.4.30 流速増加に伴う腐食速度の変化（模式図）<sup>(31)</sup>Fig. 3.4.31 Effect of velocity on corrosion of steel in seawater<sup>(30)</sup>

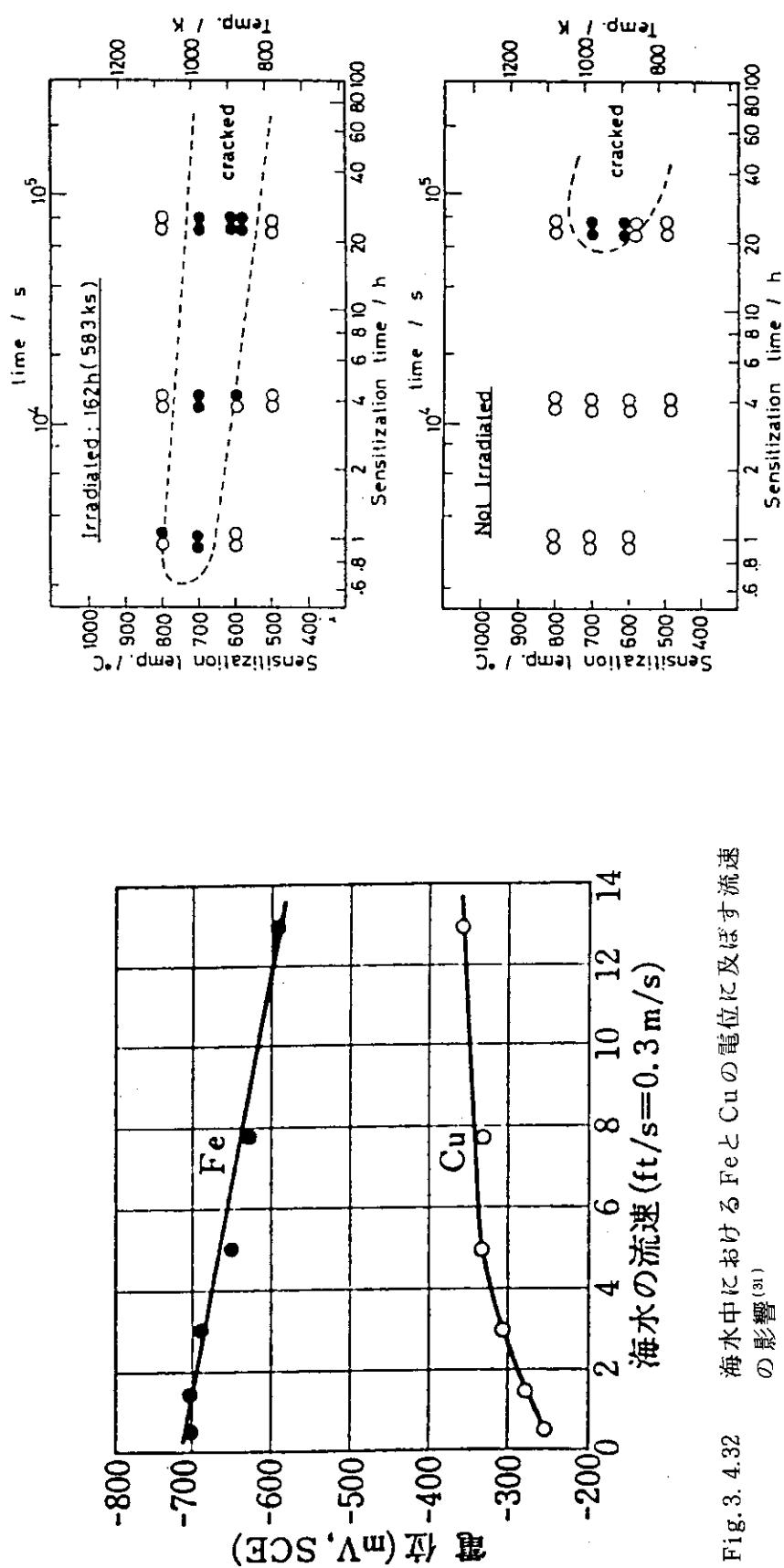


Fig. 3.4.32 海水中における Fe と Cu の電位に及ぼす流速の影響<sup>(31)</sup>

Fig. 3.4.33 Results of SCC tests with and without  $\gamma$ -ray radiation in boiling 12% NaCl solution, pH adjusted to 3 with HCl. (32)

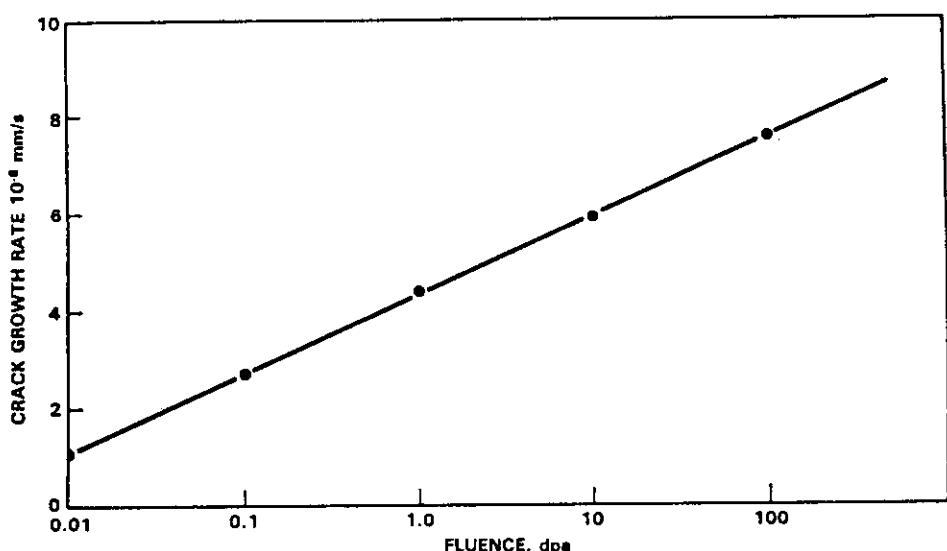


Fig. 3.4.34 Calculated crack growth rate versus fluence for intergranular stress corrosion cracking of 316SS induced by radiation enhanced grain boundary phosphorus segregation<sup>(33)</sup>

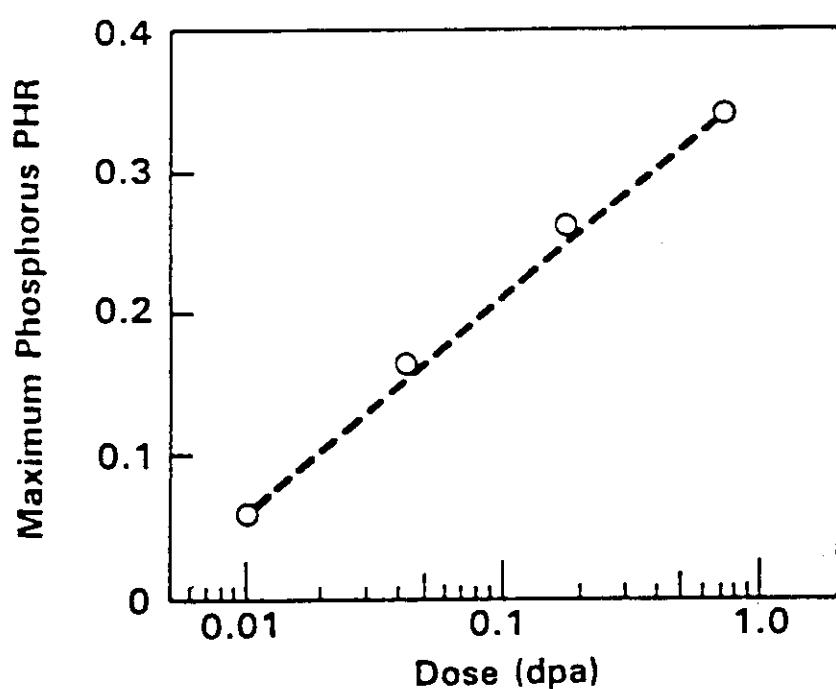


Fig. 3.4.35 Dose dependence of phosphorus segregation in 316 Stainless Steel irradiated at 875K<sup>(34)</sup>

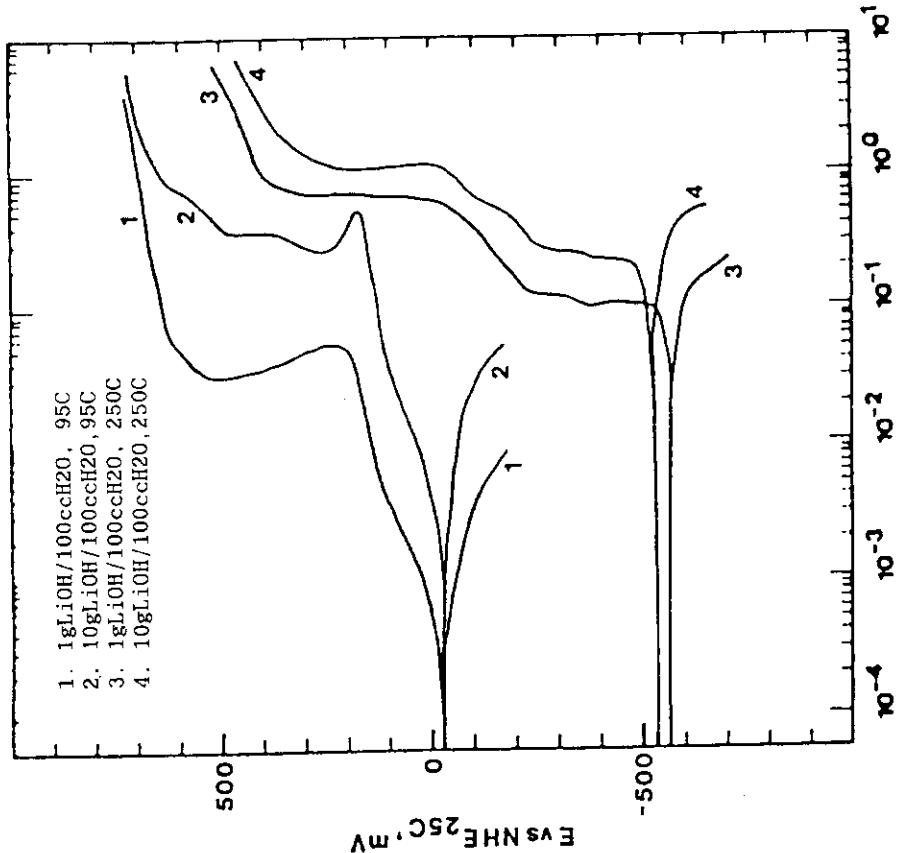


Fig. 3.4.36 Electrochemical anodic polarization curves of Zr-alloy and Type 304 Stainless Steel in a 5 wt% LiOH aqueous solution at 270°C and 12 MPa (120 bar). Reference electrode for potential measurements is Ag/AgCl in 0.1 M KCl, connected with the autoclave through a cooled electrolyte bridge. Electrode potentials are in millivolts, anodic currents are in millamps. (44)

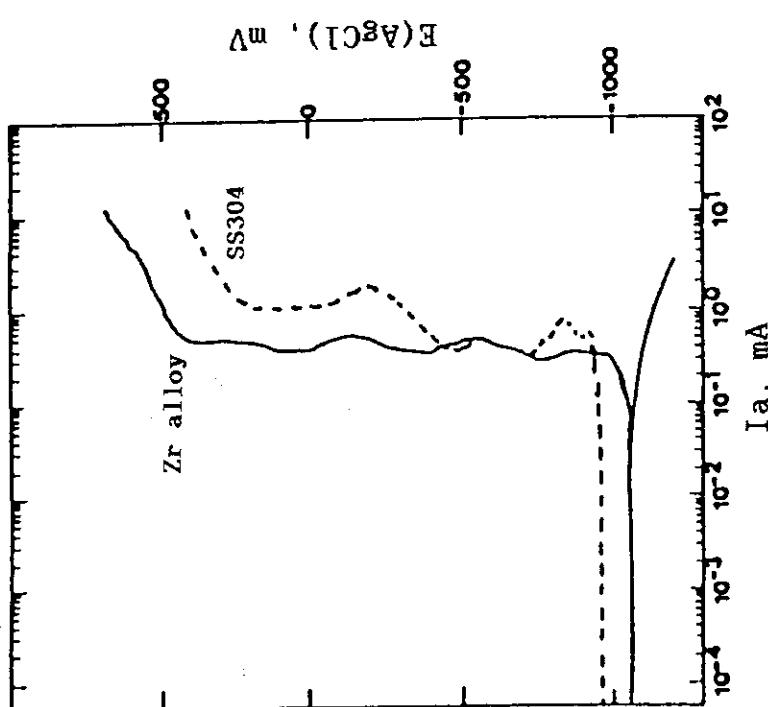


Fig. 3.4.37 Potentiodynamic polarization curves for 316L SS in LiOH solutions (45)

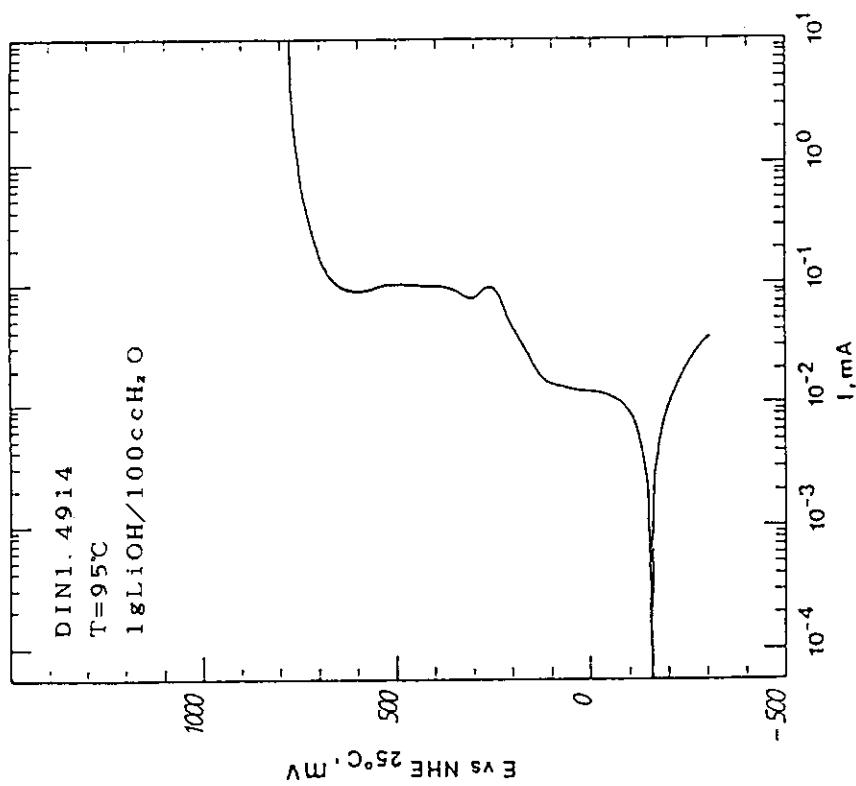


Fig. 3.4.38 Potentiodynamic polarization curves for steel DIN 1.4914 in 10g LiOH/  
100ccH<sub>2</sub>O at 95°C (46)

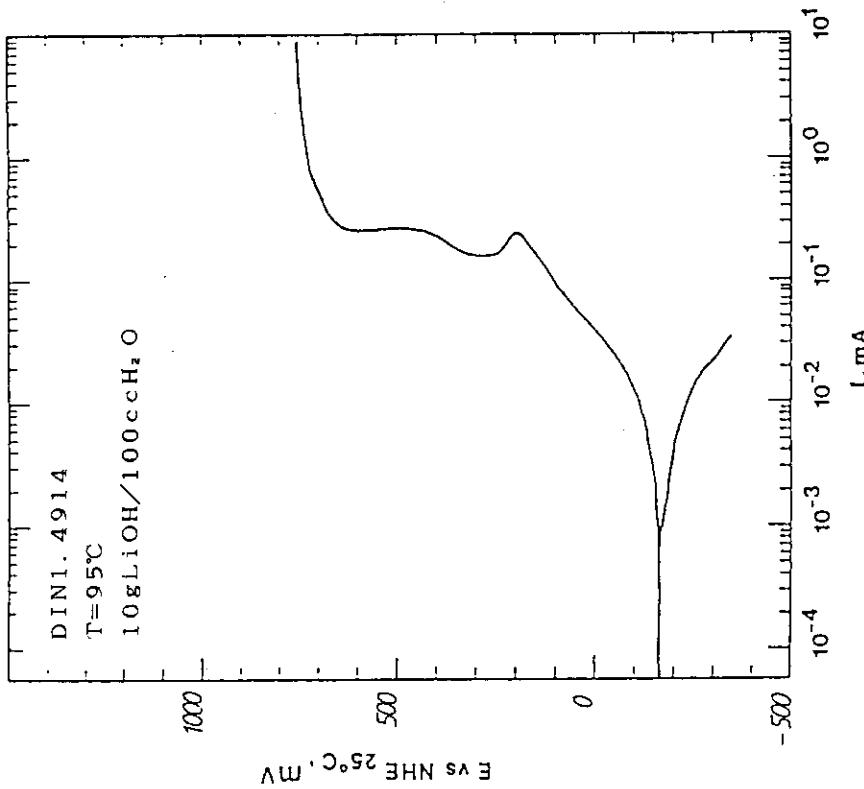


Fig. 3.4.39 Potentiodynamic polarization curves for steel DIN 1.4914 in 1g LiOH/  
100ccH<sub>2</sub>O at 95°C (46)

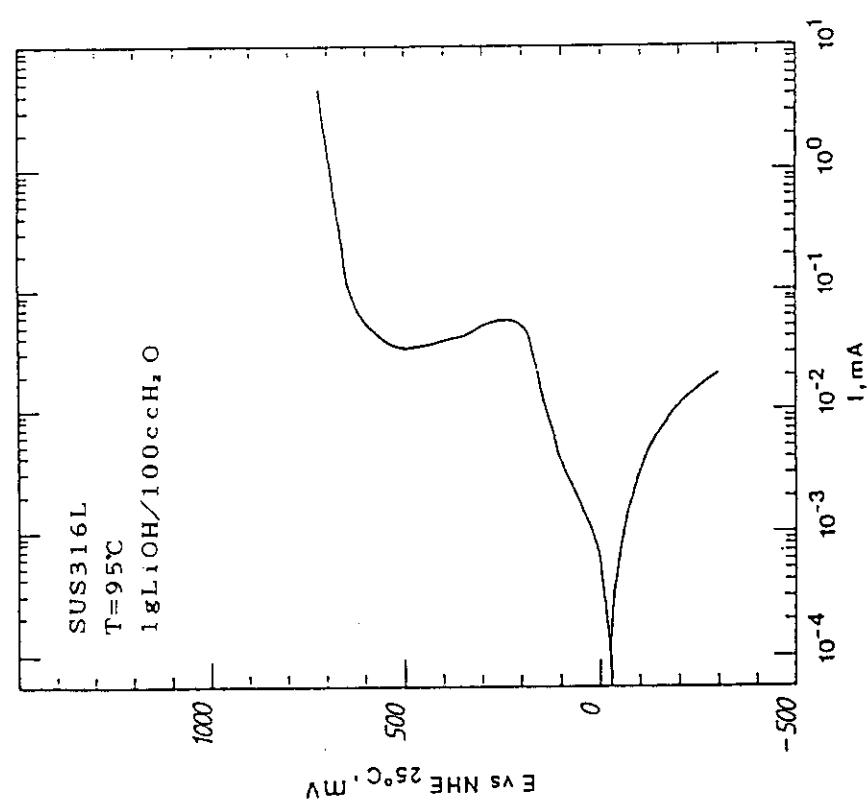


Fig. 3.4.40 Potentiodynamic polarization curves for steel AISI 316L in 1gLiOH/100ccH<sub>2</sub>O at 95°C<sup>(46)</sup>

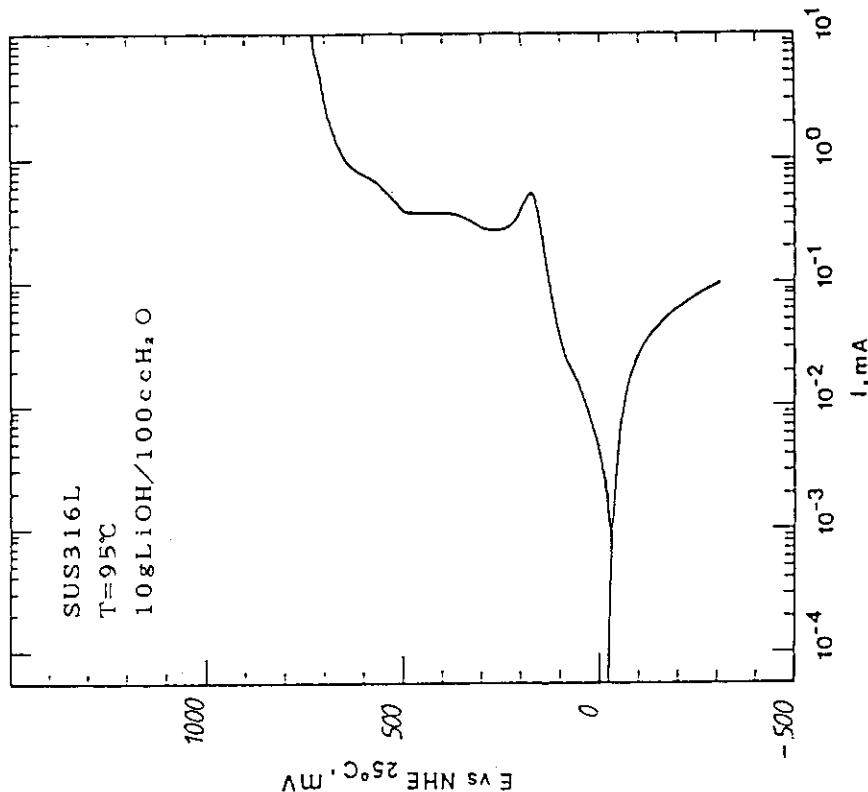


Fig. 3.4.41 Potentiodynamic polarization curves for steel AISI 316L in 10gLiOH/100ccH<sub>2</sub>O at 95°C<sup>(46)</sup>

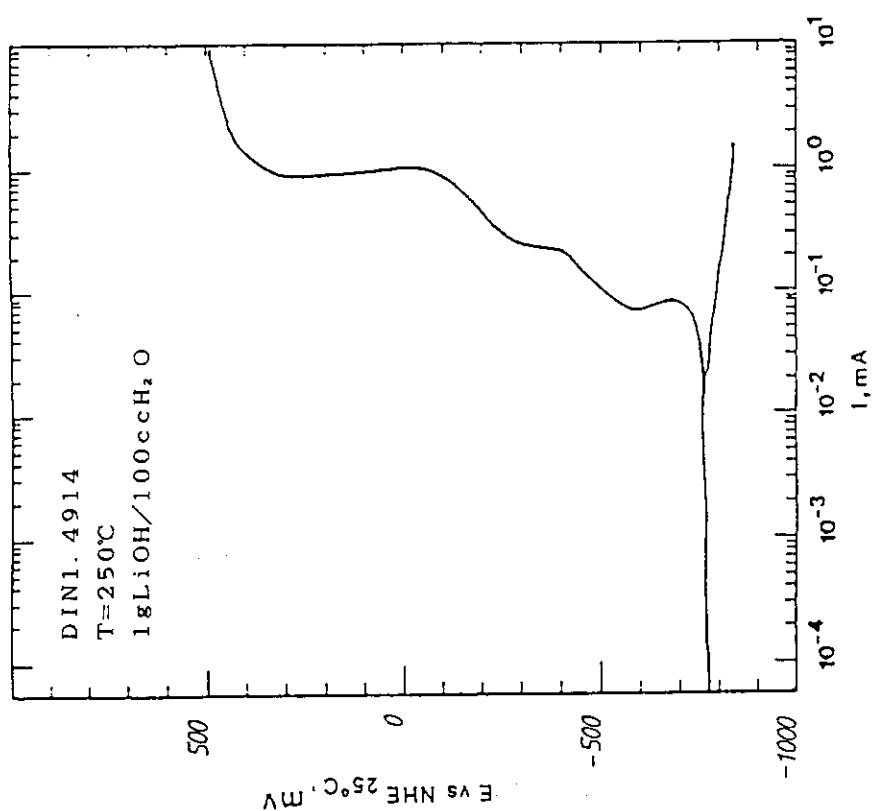


Fig. 3.4.42 Potentiodynamic polarization curves for steel DIN 1.4914 in 1g LiOH/100ccH<sub>2</sub>O at 250°C (46)

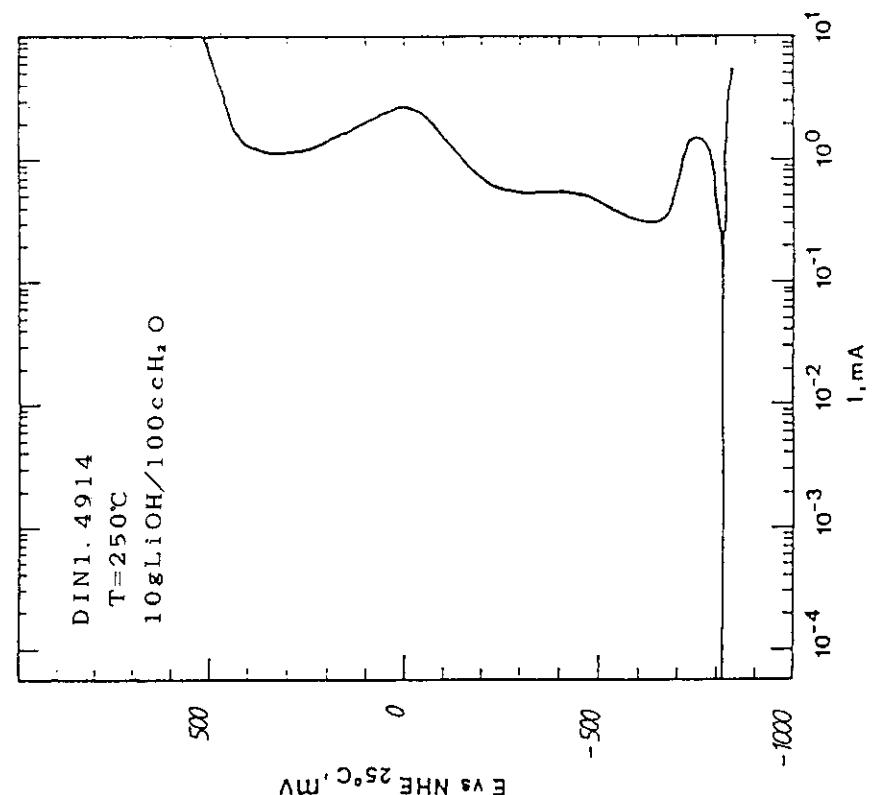


Fig. 3.4.43 Potentiodynamic polarization curves for steel DIN 1.4914 in 10g LiOH/100ccH<sub>2</sub>O at 250°C (46)

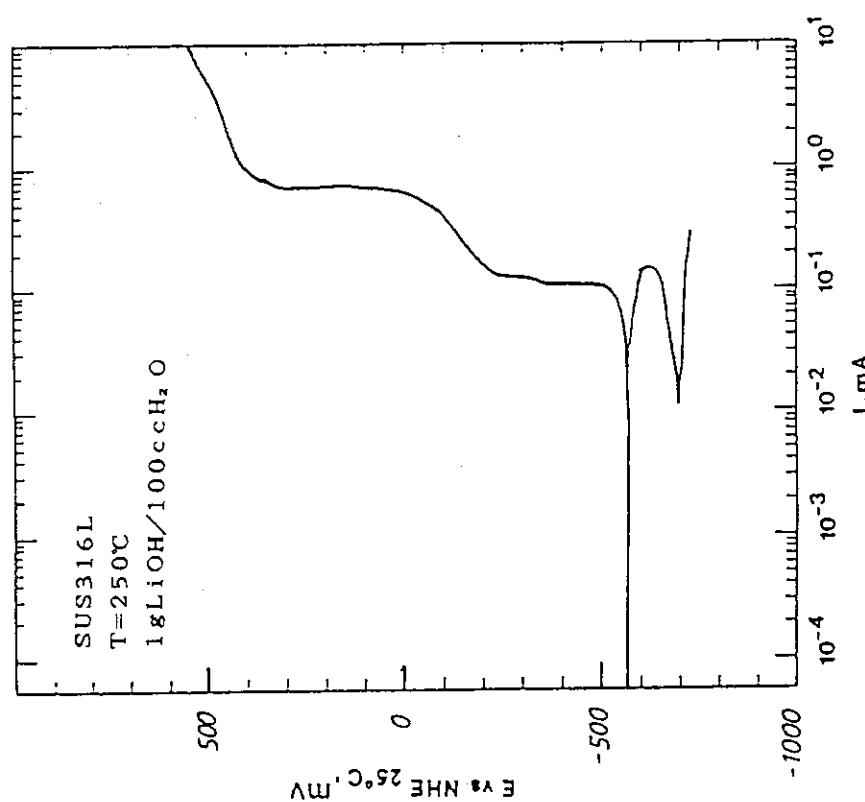


Fig. 3.4.44 Potentiodynamic polarization curves for steel AISI 316L in 1gLiOH/  
100ccH<sub>2</sub>O at 250°C (46)

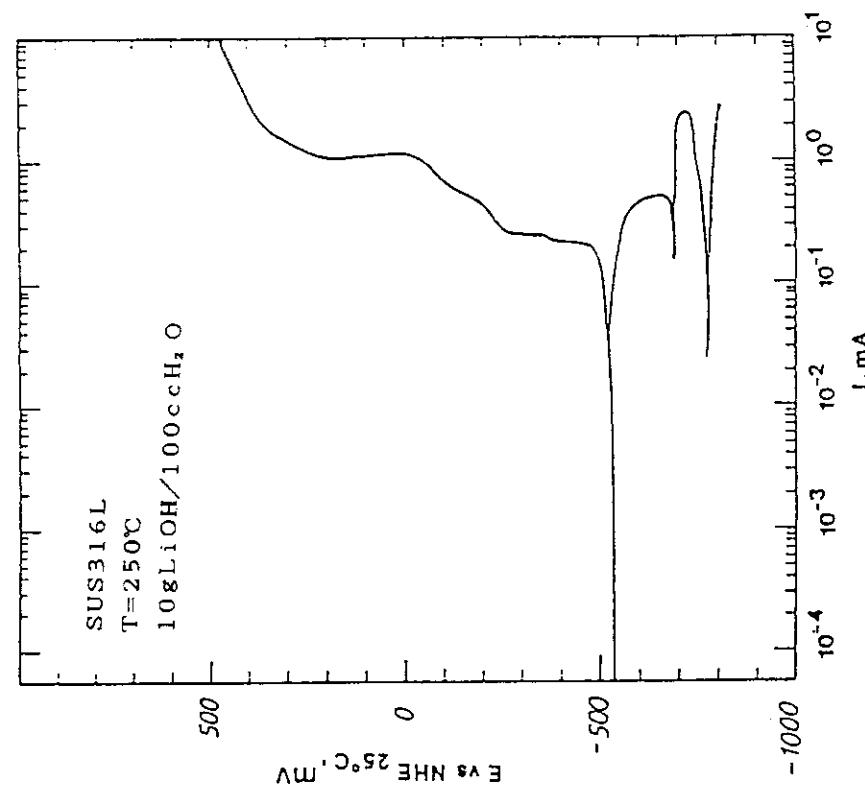


Fig. 3.4.45 Potentiodynamic polarization curves for steel AISI 316L in 10gLiOH/  
100ccH<sub>2</sub>O at 250°C (46)

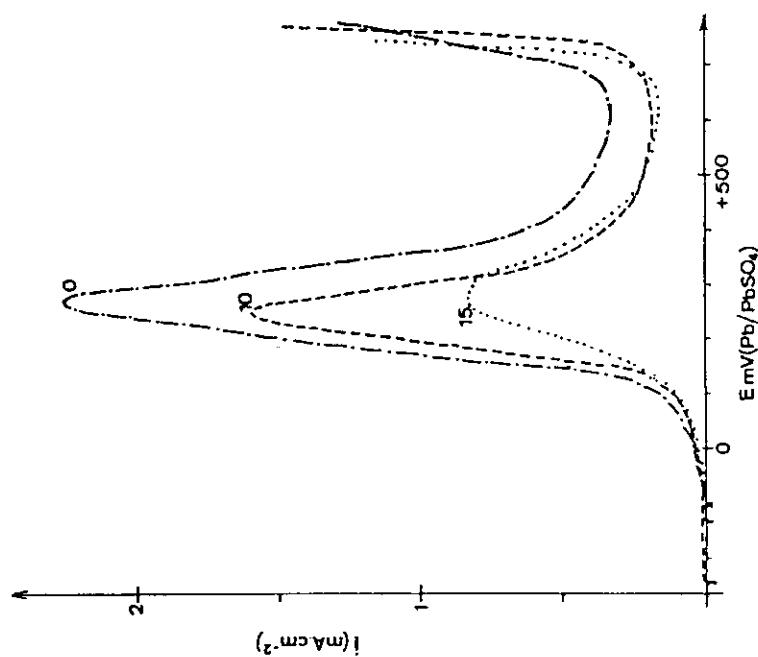


Fig. 3.4.47 Anodic polarization curves in  $\text{LiOH}$  ( $0.1\text{M}$ ) at  $250^\circ\text{C}$  for  $\text{Fe-Cr-Ni}$  alloys (Cr17%, Ni=0%, 10%, 15%) (47)

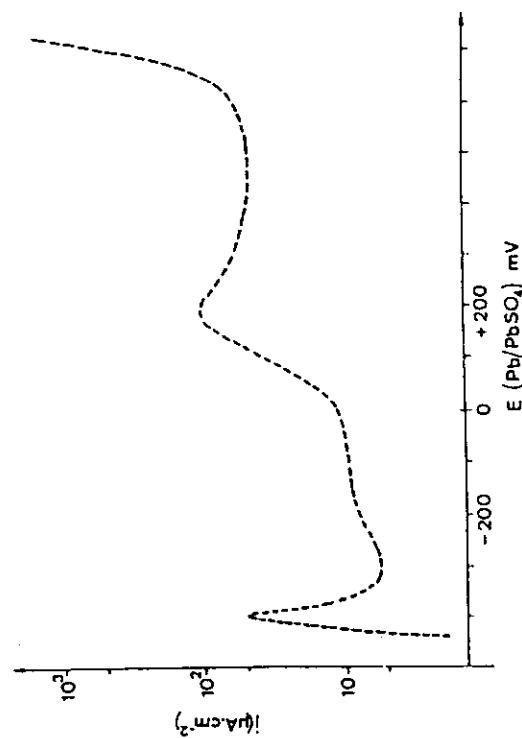


Fig. 3.4.46 Anodic polarization curve for  $\text{Fe-17Cr-7Ni}$  alloy after slight cathodic polarization (10minutes at 450mV/Pb) (47)

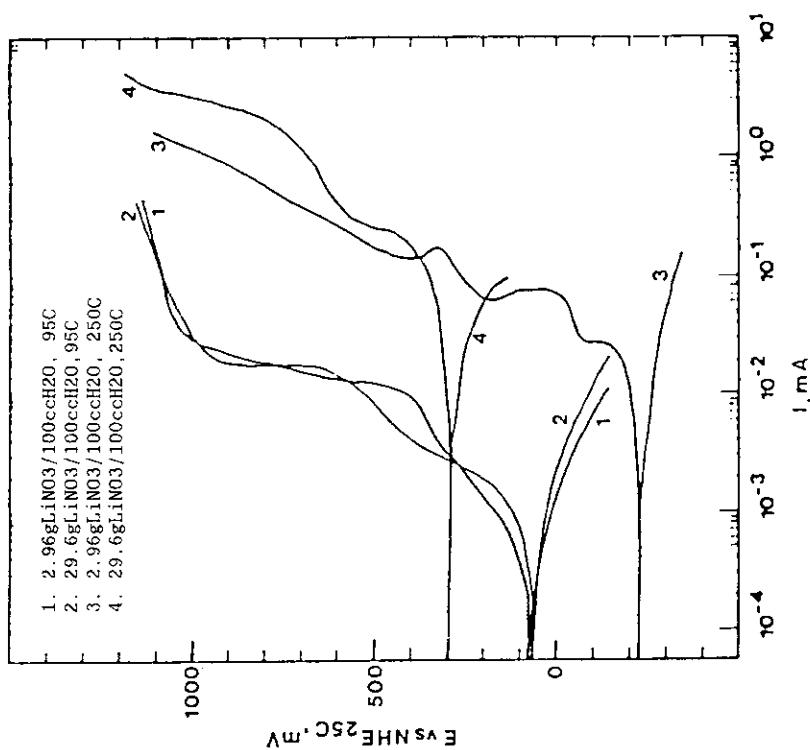


Fig. 3.4.49 Potentiodynamic polarization curves for 316L SS in  $\text{LiNO}_3$  solutions (45)

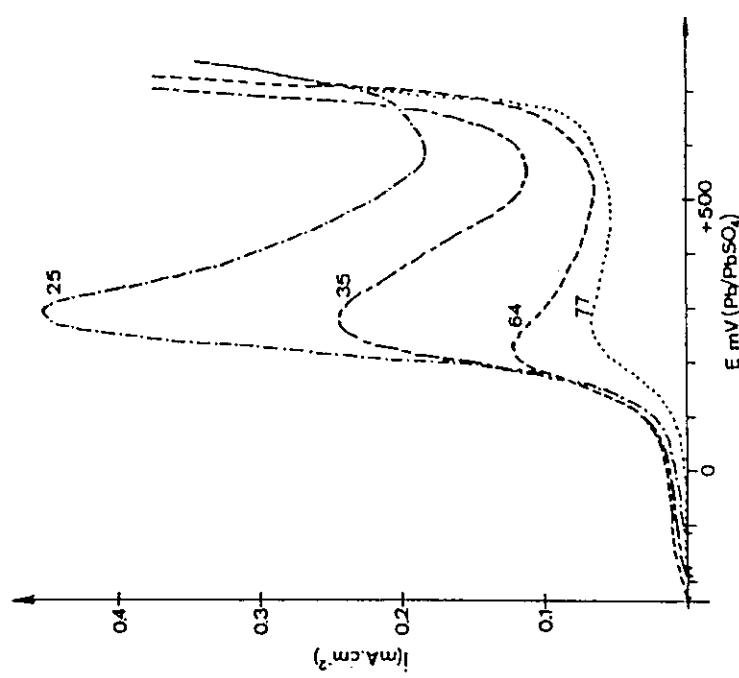


Fig. 3.4.48 Anodic polarization curves in  $\text{LiOH}$  (0.1m) at 250°C for Fe-Cr-Ni alloys (17% Cr and Ni=25%, 35%, 64%, 77%) (47)

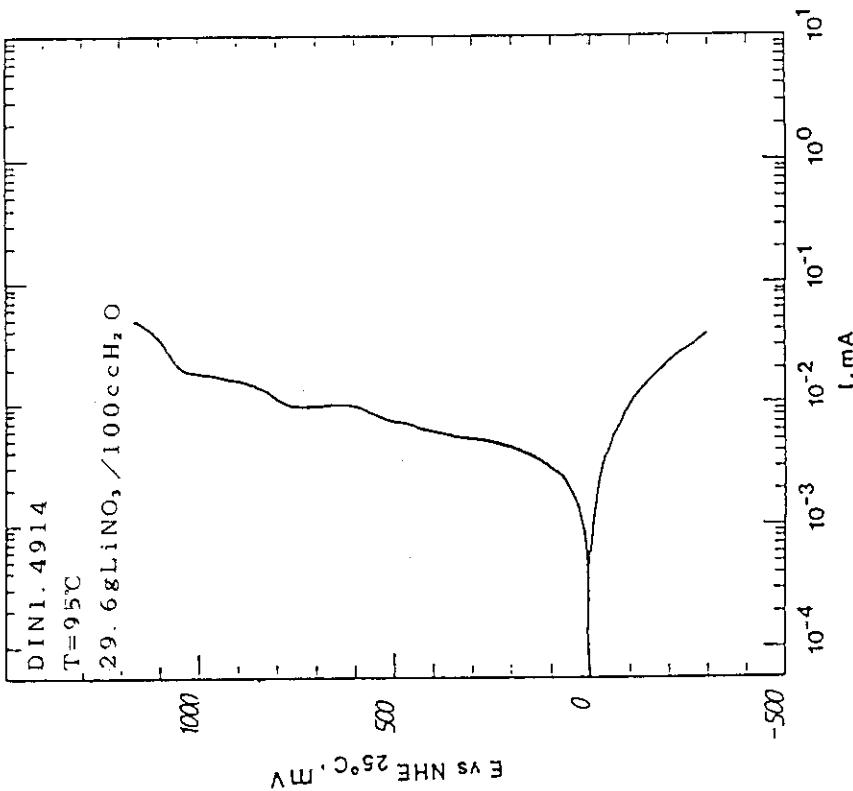


Fig. 3.4.51 Potentiodynamic polarization curves for steel DIN 1.4914 in 2.96 g LiNO<sub>3</sub>/100ccH<sub>2</sub>O at 95°C(46)

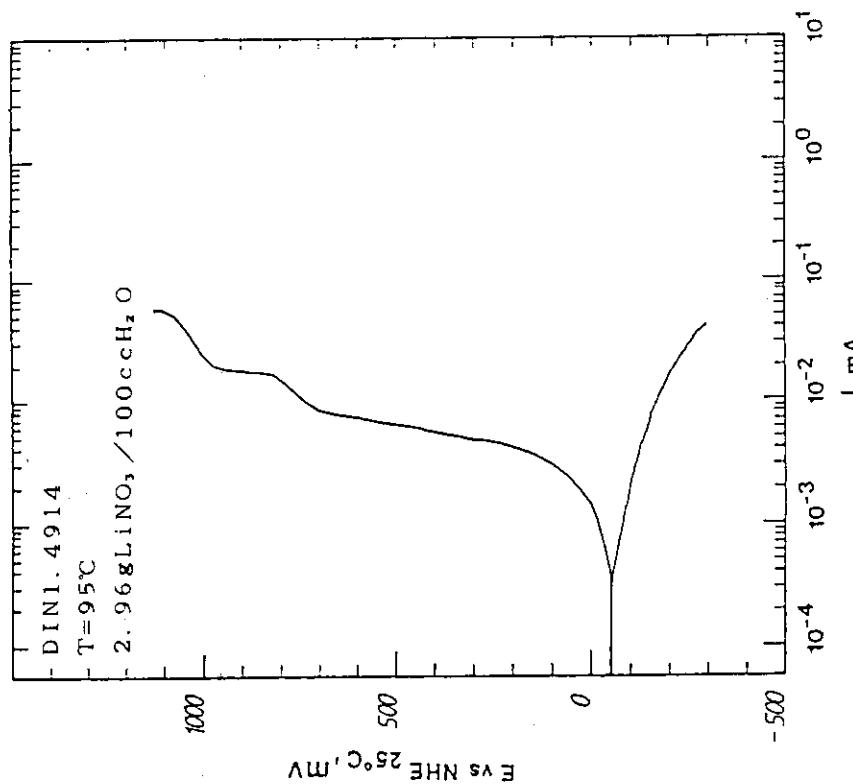


Fig. 3.4.50 Potentiodynamic polarization curves for steel DIN 1.4914 in 2.96 g LiNO<sub>3</sub>/100ccH<sub>2</sub>O at 95°C(46)

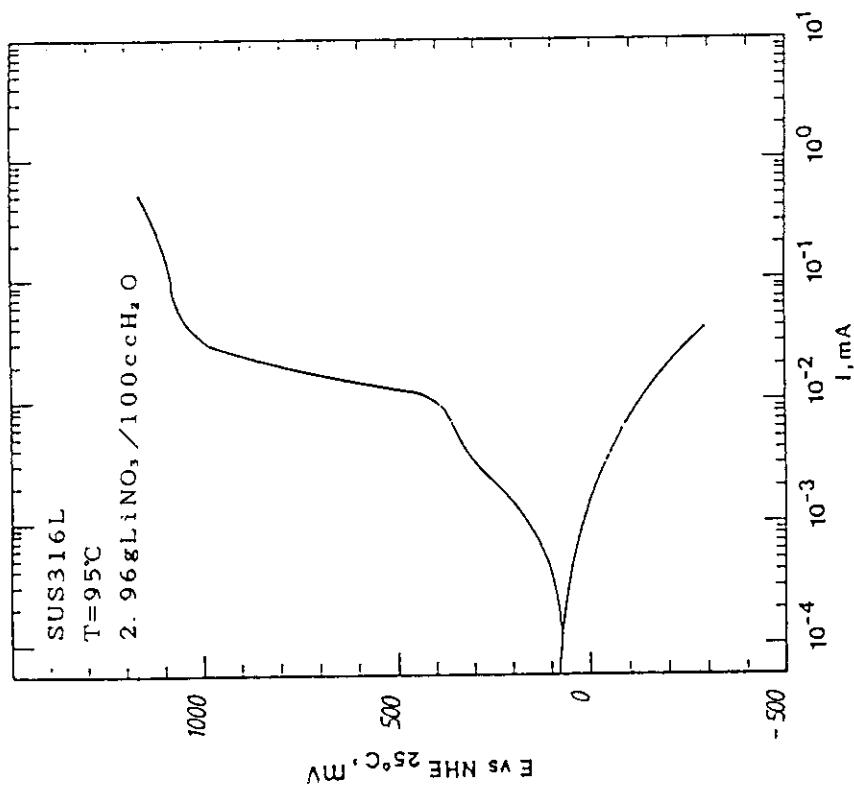


Fig. 3.4.52 Potentiodynamic polarization curves for steel AISI 316L in 2.96g  $\text{LiNO}_3$ /100cc $\text{H}_2\text{O}$  at 95°C (46)

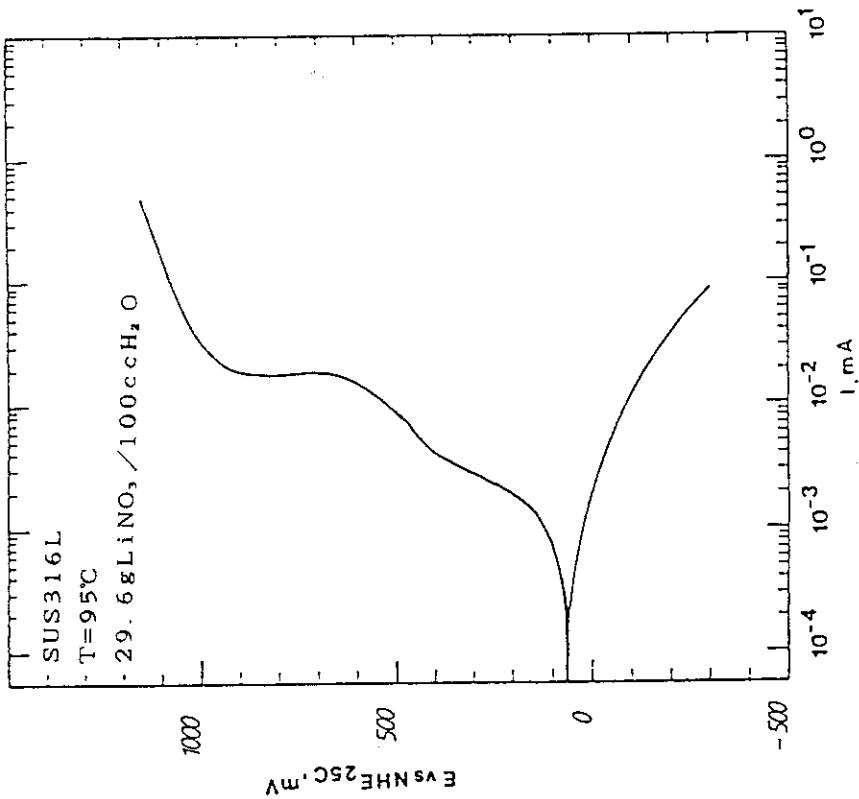


Fig. 3.4.53 Potentiodynamic polarization curves for steel AISI 316L in 29.6g  $\text{LiNO}_3$ /100cc $\text{H}_2\text{O}$  at 95°C (46)

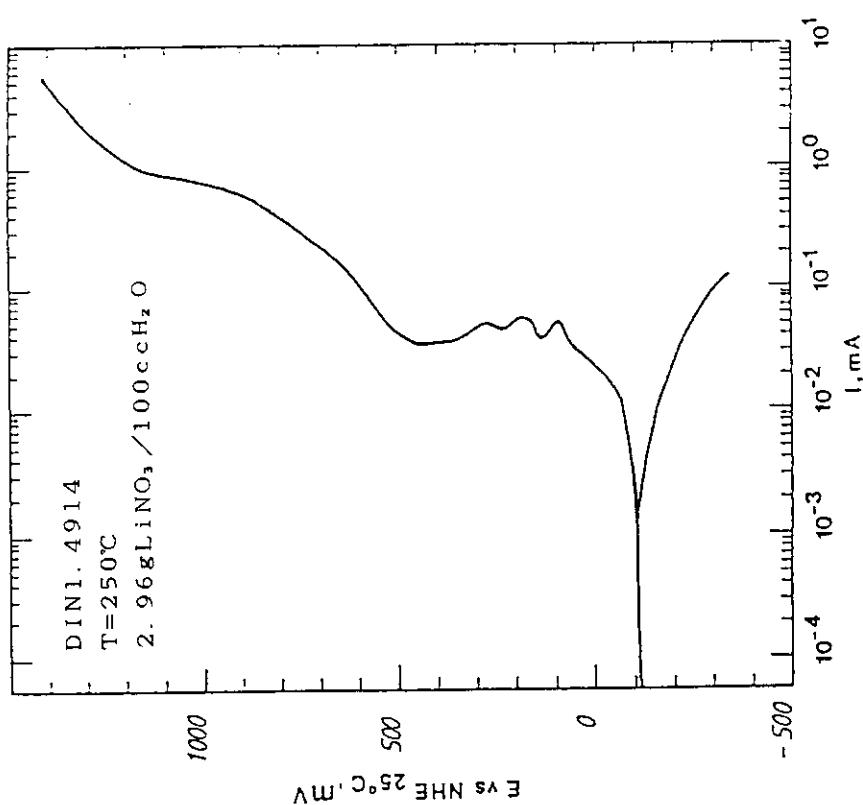


Fig. 3.4.54 Potentiodynamic polarization curves for steel DIN 1.4914 in 2.96g LiNO<sub>3</sub>/100ccH<sub>2</sub>O at 250°C (46)

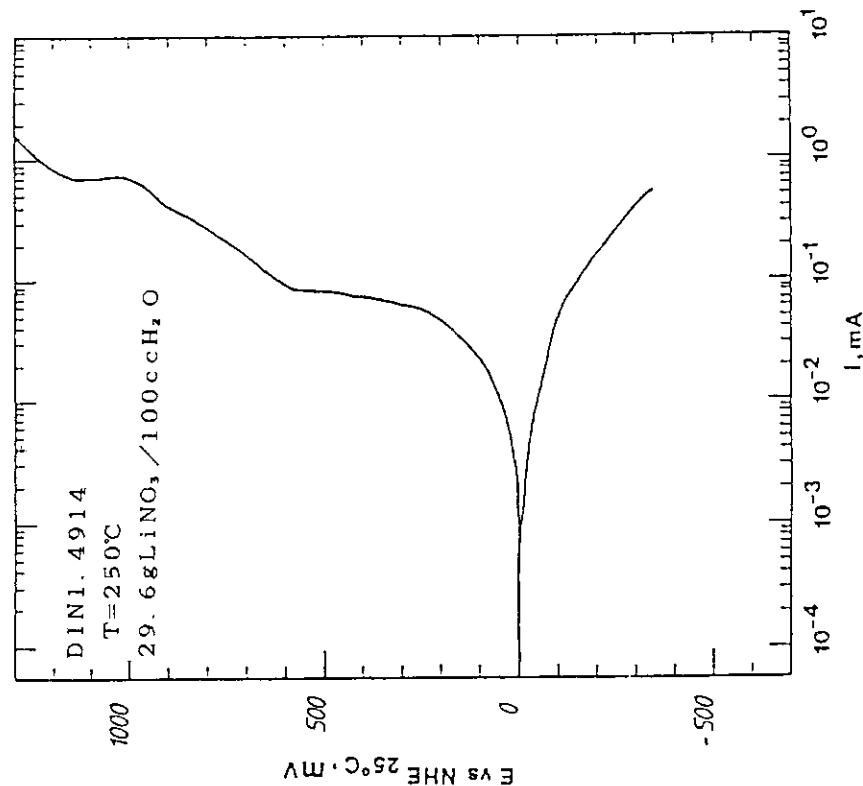


Fig. 3.4.55 Potentiodynamic polarization curves for steel DIN 1.4914 in 29.6g LiNO<sub>3</sub>/100ccH<sub>2</sub>O at 250°C (46)

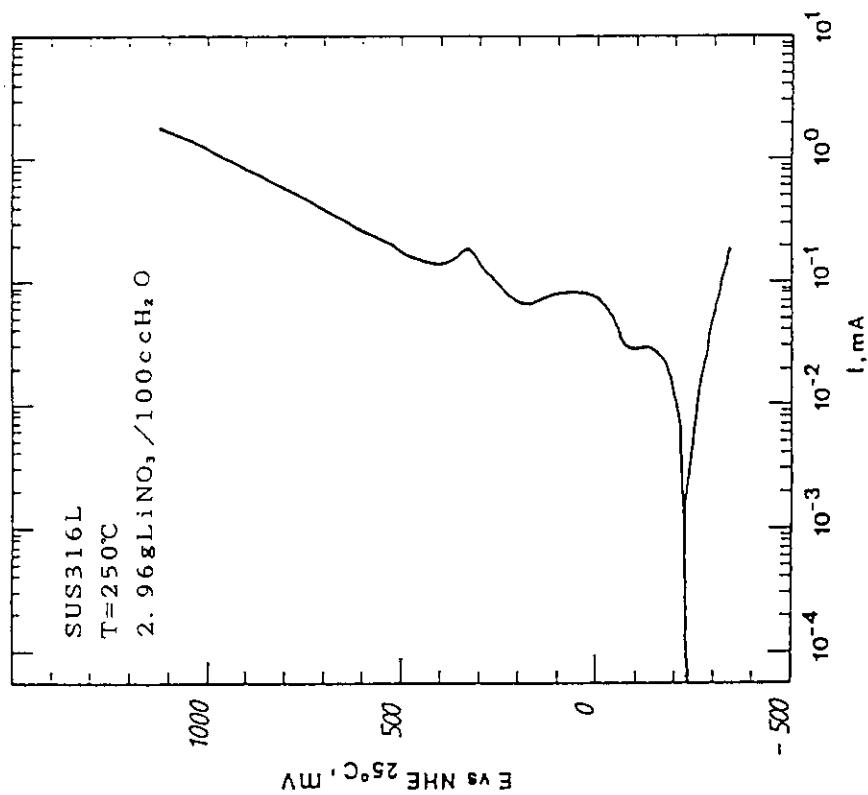


Fig. 3.4.56 Potentiodynamic polarization curves for steel AISI 316L in 2.96g LiNO<sub>3</sub>/100ccH<sub>2</sub>O at 250°C (46)

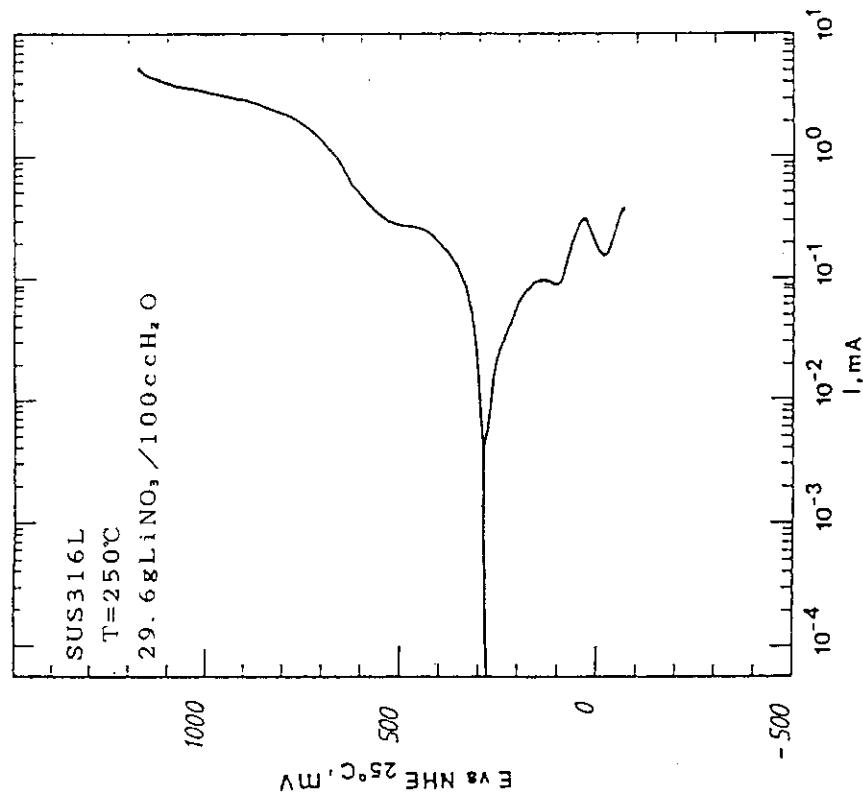


Fig. 3.4.57 Potentiodynamic polarization curves for steel AISI 316L in 29.6g LiNO<sub>3</sub>/100ccH<sub>2</sub>O at 250°C (46)

### 3.5 リチウム塩水溶液の放射線分解

本節では、放射線分解に関するデータが比較的豊富な硝酸リチウム塩水溶液に着目し、水溶液プランケットで特に問題になるとと考えられている気体の発生量を評価する。

#### 3.5.1 水素ガス生成のG値

硝酸リチウム塩水溶液プランケットにおける放射線として中性子、 $\gamma$ 線、及びLi ( $n, \alpha$ ) T反応で生成するトリチウム及び $\alpha$ 粒子などがある。このため、硝酸リチウム塩水溶液に放射線分解反応は極めて複雑と考えられるが、主要な発生ガスは水の分解生成物である水素であろう。硝酸水溶液の放射線分解による気体の発生割合を示すG値をTable3.5.1<sup>(1), (10)</sup> 及びFig.3.5.1～3.5.8<sup>(2)～(9)</sup> に示す。これらのデータは、いずれも硝酸イオン濃度が高いほど水素を生成する反応が起こりやすい (G値が大きくなる) こと示している。また、放射線の種類によりG値が大幅に異なることを示したFig.3.5.9より、プランケットで問題になるとと考えられる $\alpha$ 粒子やトリチウムは、質量が大きく線エネルギー付与 (Linear Energy Transfer) が大きいため中性子や $\gamma$ 線よりも大きなG値をもたらす可能性があることが分かる。参考データとして、 $\alpha$ 粒子による水の放射線分解のG値をTable3.5.2に示す<sup>(11)</sup>。なお、線エネルギー付与LETの単位はeV/ $\mu$ mで表され、荷電粒子が単位長さの飛程において周囲の媒体に付与するエネルギーの大きさを示す。

#### 3.5.2 窒素ガス生成のG値

硝酸塩水溶液の放射線分解で生成する窒素ガスは、硝酸イオンのN<sub>2</sub>とO<sub>2</sub>への分解に基づくものと考えられている (酸素の一部は、水のラジカルと反応し消費される)。各種放射線による窒素生成のG値をFig.3.5.10～Fig.3.5.13及びTable3.5.1に示す<sup>(2), (4), (12)</sup>。水素生成のG値の場合と同様に、硝酸イオン濃度が高いほど、また放射線の質量が大きいほどG値が大きくなり窒素ガスが生成し易い事が分かる。

#### 3.5.3 温度の影響

放射化学反応では、初期のラジカル生成反応に引き続いて複雑な一連の化学反応がおこり、その大部分 (ラジカル生成反応は除く) は一般の化学反応と同様に温度の影響を受ける。したがって、放射線分解生成物の収率は、反応の素過程の反応速度定数の温度依存性によって左右される。硝酸カリウム水溶液中の亜硝酸イオンの収率を示したFig.3.5.14に見られるように、温度が高いほど (エタノールが溶液に含まれていない場合) 亜硝酸イオンが増加することが分かる<sup>(12)</sup>。この図では、窒素ガスの収率は不明であるが、硝酸イオンの分解割合が一定であるならば、亜硝酸イオンの増加に見合う割合でN<sub>2</sub>の生成が減少するものと推定される。

#### 3.5.4 陽イオンの影響

硝酸イオンと共に存在するカチオンは、放射線分解反応に対し触媒的な作用をする場合と溶液のpHに影響を及ぼす場合とが考えられる。Fig.3.5.8は各種カチオンの硝酸塩水溶液におけるH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

ガス, H<sub>2</sub>ガス, 亜硝酸イオン及びO<sub>2</sub>ガス生成のG値をまとめたものである<sup>(9)</sup>。硝酸リチウム水溶液では, 過酸化水素ガスが生成しやすい傾向があることが注目される。

### 3.5.5 pHの影響

pHは放射線分解で生成したラジカルの反応経路に影響を及ぼすことから, Fig.3.5.15に示すように亜硝酸イオン及び過酸化水素ガス生成のG値もpHによって複雑に変化する<sup>(14)</sup>。

### 3.5.6 溶存ガスの影響

水溶液中に溶存しているガスは, 放射線の作用により水あるいは溶質と反応する場合がある。Fig.3.5.16に, 窒素が溶存している場合の亜硝酸及び硝酸イオンの収量と照射線量との関係を示す<sup>(15)</sup>。

### 3.5.7 照射線量の影響

硝酸水溶液の放射線分解に対するγ線及びα線の照射線量の影響をFig.3.5.17<sup>(1)</sup> 及びFig.3.5.18に示す<sup>(16)</sup>。放射線分解の収量は, いずれの放射線についても線量とともにほぼ直線的に増加するが, 硝酸イオン濃度が低いばあいには飽和傾向も認められる。ブランケット内のトリチウム増殖反応で生成するトリチウムとα粒子の全エネルギーは, 每秒あたり  $1.7 \times 10^{21} \text{ MeV}$  程度であり, 放射線の作用による生成ガス量も膨大になると予想される。照射線量の飽和効果の有無が, 生成ガス量を大きく左右するので, 今後より正確なデータの取得が望まれる。

## 参考文献

- (1) Kazanjian,A.R., Miner,F.J., Brown,A.K., Hagan, P.G., Berry,J.W. : Trans. Faraday Soc., 66, 2192 (1970)
- (2) Boyle,J.W., Mahlman,H.A. : Nuclear Science and Engineering, 2, 492 (1957)
- (3) Sowden,R.G. : J. Am. Chem. Soc., 79, 1263 (1957)
- (4) Savel'ev,Yu.I., Ershova,Z.V., Vladimirova,M.V. : Sov. Radiochem., 9, 221 (1967)
- (5) Bibler,N.E. : J. Physical Chemistry, 78, 211 (1974)
- (6) Kazanjian,A.R., Horrell,D.R. : Radiation Effects, 13, 277 (1972)
- (7) Vladimirova,M.V., Kulikov,I.A., Shulyatikova,L.G. : Sov. Radiochem., 8, 207 (1966)
- (8) Ganzha,V.D., Konoplev,K.A., Mashchetov,V.P., Orlov,S.P., Trenin,V.D. : Sov. At. Energy, 59, 746 (1985)
- (9) Kiwi,J.T., Daniels,M. : J. Inorg. Nucl. Chem., 40, 576 (1978)
- (10) Weiss,J.R., Pietri,C.E. : Radiation Effects, 19, 191 (1973)
- (11) Eriksen,T.E., Christensen,H., Bjergbakke,E. : J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles, 116, 13 (1987)
- (12) Sowden,R.G., Lynde,E.M. : J. Am. Chem. Soc., 80, 2593 (1958)
- (13) Kalecinski, J. : Bull. Acad. Pol. Sci., Chim., 21, 209 (1973)

- (14) Daniels,M., Wigg,E.E. : J. Physical Chemistry, 73, 3703 (1969)
- (15) Dmitriev,M.T. : Zh. Prikl. Khim, 36, 1123 (1963)
- (16) Ershova,Z.V., Vladimirova,M.V., Savel'ev,Yu.I. : Soviet Radiochem., 8,, 395 (1966)
- (17) Gierszewski,P. : "Aqueous Salt Blanket Tritium System Interface Parameters", Memorandum to D.K.Sze and J.Anderson, July (1988)
- (18) Sreiner,D., Varsamis,G., Rathke,J.W., Deutsch,L.A., Gierszewski,P. : preprint of "Int. Symp. on Fusion Nucl. Tech., Tokyo 1988"
- (19) 日本化学会編：“化学便覧基礎編”，改訂2版，丸善（1975）

Table 3.5.1 Gaseous product-G values

product	(A) (gamma radiation) <sup>(1)</sup>		
	0.1 M HNO <sub>3</sub>	1 M HNO <sub>3</sub>	10 M HNO <sub>3</sub>
O <sub>2</sub>	0.01	0.04	0.70
H <sub>2</sub>	0.08	0.05	0.01
N <sub>2</sub>	0.004	0.007	0.006
NO	trace	0.002	0.003
total gas	0.11	0.11	0.08

(B) (alpha radiation)<sup>(10)</sup>  
G(H<sub>2</sub>) values for Pu in various acids

HNO <sub>3</sub> , M	G(H <sub>2</sub> )
1.0	0.20
2.4	0.13
4.2	0.059
5.0	0.056
6.6	0.057
8.0	0.024
10.0	0.018
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , M	G(H <sub>2</sub> )
0.1	1.6
HClO <sub>4</sub> , M	G(H <sub>2</sub> )
1.0	0.37

Table 3.5.2 Primary G-values for alpha-radiolysis of water<sup>(11)</sup>

Reference	G, events/100 eV							
	-H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	H	e <sub>aq</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	HO <sub>2</sub>	OH	H <sup>•</sup>
COHEN <sup>1</sup>	3.34	1.7	0.16	0.04	1.3	0.3	0.1	0.04
BIBLER <sup>4</sup>	2.97	1.28	0.50	0.13	0.98	0.35	0.18	0.13
BURNS <sup>5</sup>	2.63	1.17	0.14	0.13	0.92	0.11	0.44	0.13
Best estimate								
CHRISTENSEN <sup>1, 6</sup>	2.71	1.3	0.21	0.06	0.985	0.22	0.24	0.06

Table 3.5.3 加圧下における気体の水に対する溶解度  $\gamma^{(19)}$ 

気体	温度 °C	圧力/atm						
		25	50	100	200	300	400	500
$H_2$	0	0.5363	1.068	2.130	4.187	6.139	8.009	9.838
	10	0.4870	0.969	1.932	3.796	5.579	7.300	8.980
	20	0.4498	0.895	1.785	3.499	5.158	6.766	8.328
	30	0.4263	0.848	1.689	3.311	4.897	6.430	7.922
	40	0.4133	0.822	1.638	3.210	4.747	6.245	7.705
	50	0.4067	0.809	1.612	3.165	4.695	6.166	7.613
	60	0.4053	0.810	1.610	3.168	4.692	6.173	7.625
	70	0.4093	0.817	1.628	3.208	4.746	6.249	7.717
	80	0.4203	0.839	1.667	3.286	4.866	6.392	7.885
	90	0.4385	0.872	1.727	3.402	5.042	6.600	8.129
	100	0.4615	0.912	1.805	3.544	5.220	6.841	8.429
$He$	0	0.2322	0.4674	0.9240	1.807	--	3.436	--
	25	0.2156	0.4332	0.8491	1.688	--	3.241	--
	50	0.2225	0.4445	0.8827	1.734	--	3.358	--
	75	0.2442	0.4892	0.9699	1.907	--	3.666	--
$N_2$	0	--	--	1.46	3.19	3.60	--	--
	25	0.348	0.674	1.264	2.257	3.061	--	4.441
	50	0.273	0.533	1.011	1.830	2.534	$2.49 \times 10^{-3}$	3.720
	75	0.254	0.494	0.946	1.732	2.413	--	3.583
	100	0.266	0.516	0.986	1.822	2.546	$2.52 \times 10^{-3}$	3.799
	144	--	--	1.025	2.68	3.46	--	--
	169	--	--	1.08	3.29	3.83	--	--
$CO_2$	0	30.46	--	--	--	--	--	--
	12.4	20.34	35.54	36.77	39.77	41.07	--	--
	15	--	--	--	--	--	--	--
	18	19.51	32.03	33.98	37.17	39.31	--	--
	25	--	27.23	31.75	--	--	38.62	39.74
	31	14.18	24.15	30.17	32.78	--	36.78	38.67
	35	12.95	22.21	29.13	31.83	--	35.73	37.99
	40	11.62	20.35	27.81	30.74	--	34.87	36.73
	50	9.71	17.25	25.63	29.14	31.34	33.29	--
	75	6.82	12.59	20.61	26.66	29.51	31.88	--
	100	5.36	10.18	17.67	25.69	29.53	32.39	34.4

単位の換算: 1 atm=101 325 Pa

\*  $N_2$  のモル分率

(2)

気体	温度 °C	圧力 atm	7	気体	温度 °C	圧力 mmHg	溶解度 g/1 H <sub>2</sub> O	気体	温度 °C	圧力 atm	溶解度 g/1 H <sub>2</sub> O
$O_2$	25	5	0.14	$H_2S$	5	838	6.49	$H_2S$	30	2 785	11.04
	10	0.28	--		10	1 176	9.12		40	934	2.92
	25	0.70	--		--	914	6.12		--	1 370	4.30
$CH_4$	25	10	0.3		--	1 279	8.54		--	1 853	5.85
	50	1.5	--		--	1 567	10.40		--	2 278	7.31
	100	3.0	--		--	2 112	13.94		--	3 095	9.93
空気	0	100	1.90		20	1 067	5.42		60	1 162	2.48
	25	1.52	--		--	1 483	7.44		--	1 681	3.55
	35	1.32	--		--	1 817	9.17		--	2 213	4.90
	50	1.12	--		--	2 454	12.38		--	2 731	6.04
	75	0.95	--		30	830	3.25		--	3 707	8.25
	100	1.04	--		--	1 219	4.80		--	--	--
	150	1.40	--		--	1 674	6.57		--	--	--
	200	1.97	--		--	2 052	8.15		--	--	--

単位の換算: 1 mmHg=133.322 Pa

## 溶解度の表示

a: Bunsen 吸収係数。気体の分压が 760 mmHg (101 325 Pa) であるとき、温度 t/°C の溶媒 1 ml に溶解する気体の体積/ml を 0°C、760 mmHg に換算した値。

$\beta$ : Ostwald 溶解度係数。気体の分压が 760 mmHg であるとき、温度 t/°C の溶媒 1 ml に溶解する気体の体積/ml をその実験温度 t/°C、760 mmHg で測った値。

$$\beta = \frac{273 + t}{273}$$

$\gamma$ : Kuenen 吸収係数。気体の分压が 760 mmHg のとき、温度 t/°C の溶媒 1 g に溶解する気体の体積/ml を 0°C、760 mmHg に換算した値。

f: 気相の全圧 (気体分圧+溶媒蒸気圧) が 760 mmHg であるとき、温度 t/°C の溶媒 1 ml に溶解する気体の体積/ml を 0°C、760 mmHg に換算した値。

q: 気相の全圧 (気体分圧+溶媒蒸気圧) が 760 mmHg であるとき、温度 t/°C の溶媒 100 g に溶解する気体の量/g。

g: Henry の法則によると、圧力のあまり高くない範囲では一定温度で気体の溶解度はその分圧に比例するから a,  $\beta$ ,  $\gamma$  に  $p/760$  をかけると、分圧  $p$ /mmHg での溶解度が求められる。

$$\text{Henry の定数 } K = \frac{p}{x_2}$$

$p$ : 分圧/mmHg,  $x_2$ : 溶質のモル分率

このほか必要に応じて他の単位を用いて表わされるが、それはそれぞれの個所に記載してある。

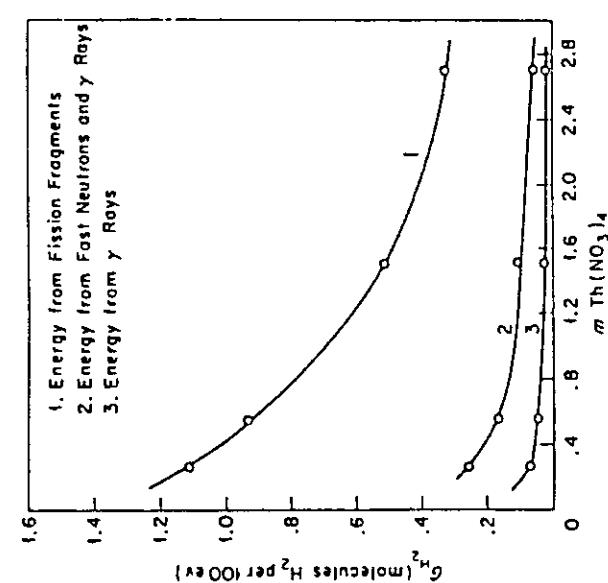


Fig. 3.5.1 Hydrogen yield as a function of  $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$  concentration for various types of radiation (2)

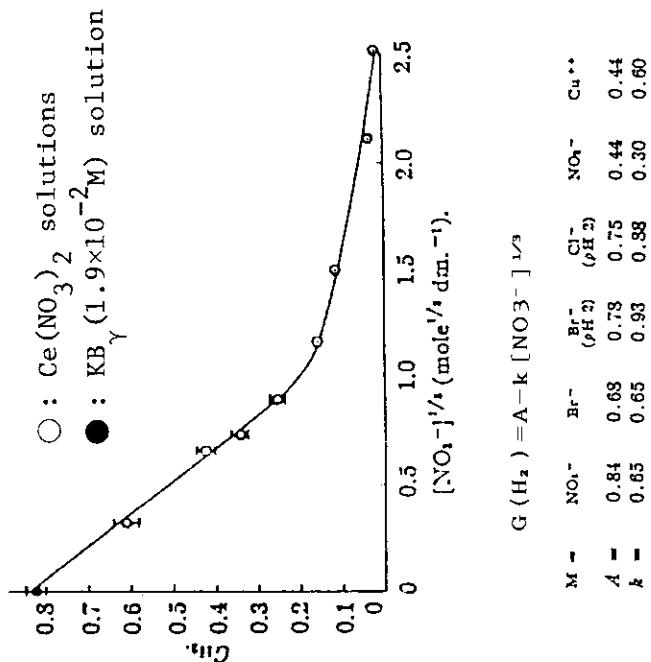
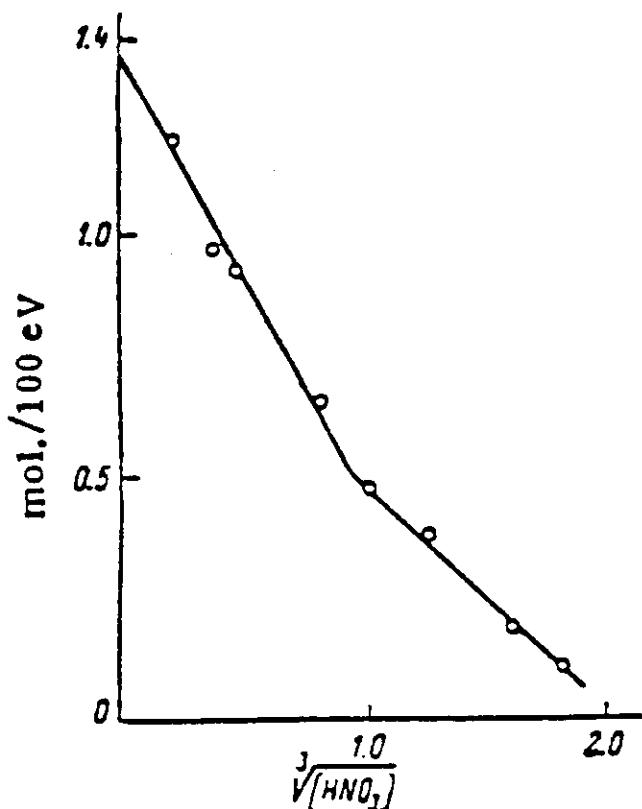


Fig. 3.5.2 Variation of  $G(H_2)$  with  $[\text{NO}_3^-]$  (3)



$$M=0 \sim 1 \text{ mol solution} \\ G(H_2) = 1.37 - 0.47 \sqrt{[HNO_3]}, \text{ M}$$

$$M=1 \sim 6 \text{ mol solution} \\ G(H_2) = 0.93 - 0.31 \sqrt{[HNO_3]}, \text{ M}$$

Fig. 3.5.3 Radiation yields of hydrogen from nitric acid solutions <sup>(4)</sup>

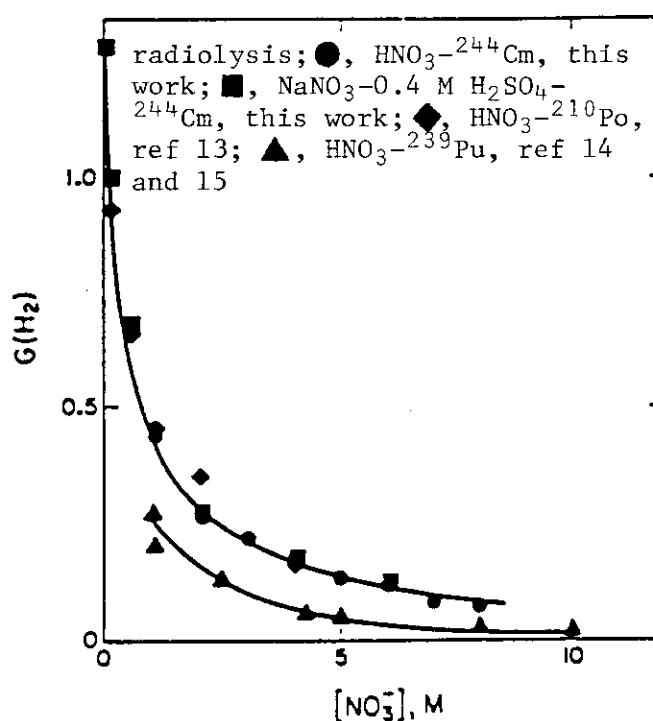


Fig. 3.5.4 Dependence of  $G(H_2)$  on nitrate concentration in  $\alpha$  <sup>(5)</sup>

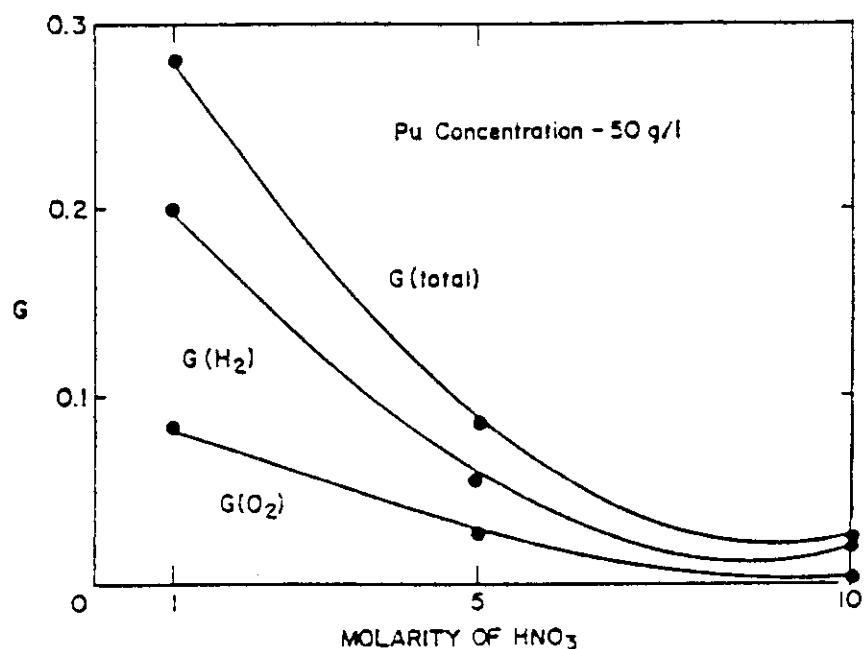
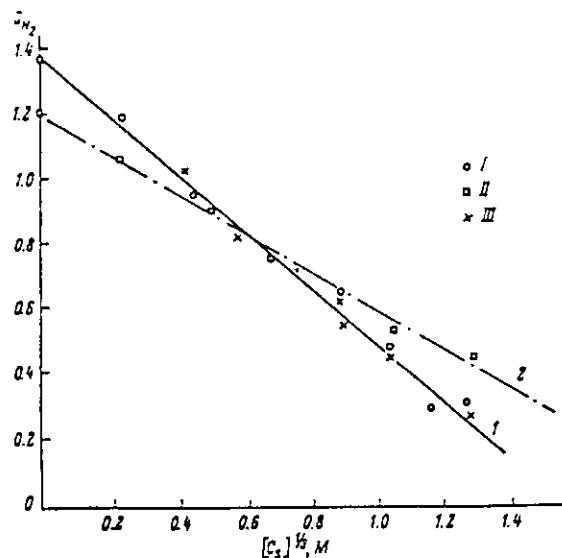
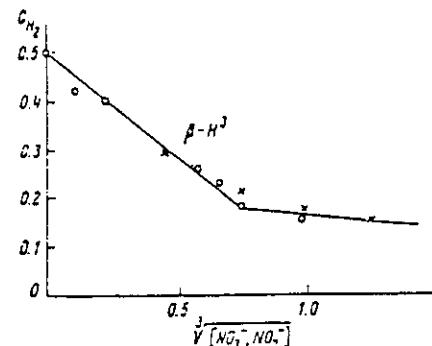


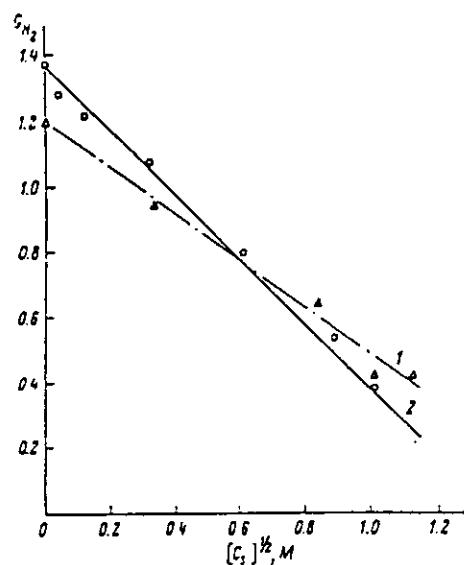
Fig. 3.5.5 Gas production as a function of acid concentration<sup>(6)</sup>



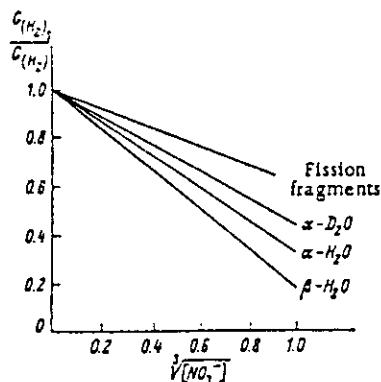
Fall in  $H_2$  yield for various acceptors in  $\alpha$ -radiolysis. 1)  $H_2O$ ; 2)  $D_2O$ ; I,II)  $NO_3^-$ ; III)  $NO_2^-$ .



Fall in  $H_2$  yield for the acceptors  $NO_3^-$  and  $NO_2^-$  in  $\beta$ -radiolysis.



Fall in  $H_2$  yield in relation to the  $UO_2^{+2}$  concentration in  $\alpha$ -radiolysis.  
1)  $H_2O$ ; 2)  $D_2O$ .



Relative fall in  $H_2$  yield  
for various forms of radiation  
for  $NO_3^-$  acceptor.

$$G(H_2) \alpha = 1.40 - 0.97 \sqrt{[NO_3^-]}, [NO_3^-]$$

$$G(D_2) \alpha = 1.20 - 0.63 \sqrt{[NO_3^-]}, [NO_3^-]$$

$$G(H_2) \beta = 0.50 - 0.4 \sqrt{[NO_3^-]}, [NO_3^-]$$

with acceptor concentrations of 0.01-1.0 M and

$$G(H_2) \gamma = 1.40 - \sqrt{[UO_2^{+2}]}, [UO_2^{+2}]$$

$$G(D_2) \gamma = 1.20 - 0.73 \sqrt{[UO_2^{+2}]}$$

with  $UO_2^{+2}$  concentrations of 0.001-1.0 M.

Fig. 3.5.6  $\alpha$ - and  $\beta$ -radiolysis of aqueous solutions of light and heavy water<sup>(7)</sup>

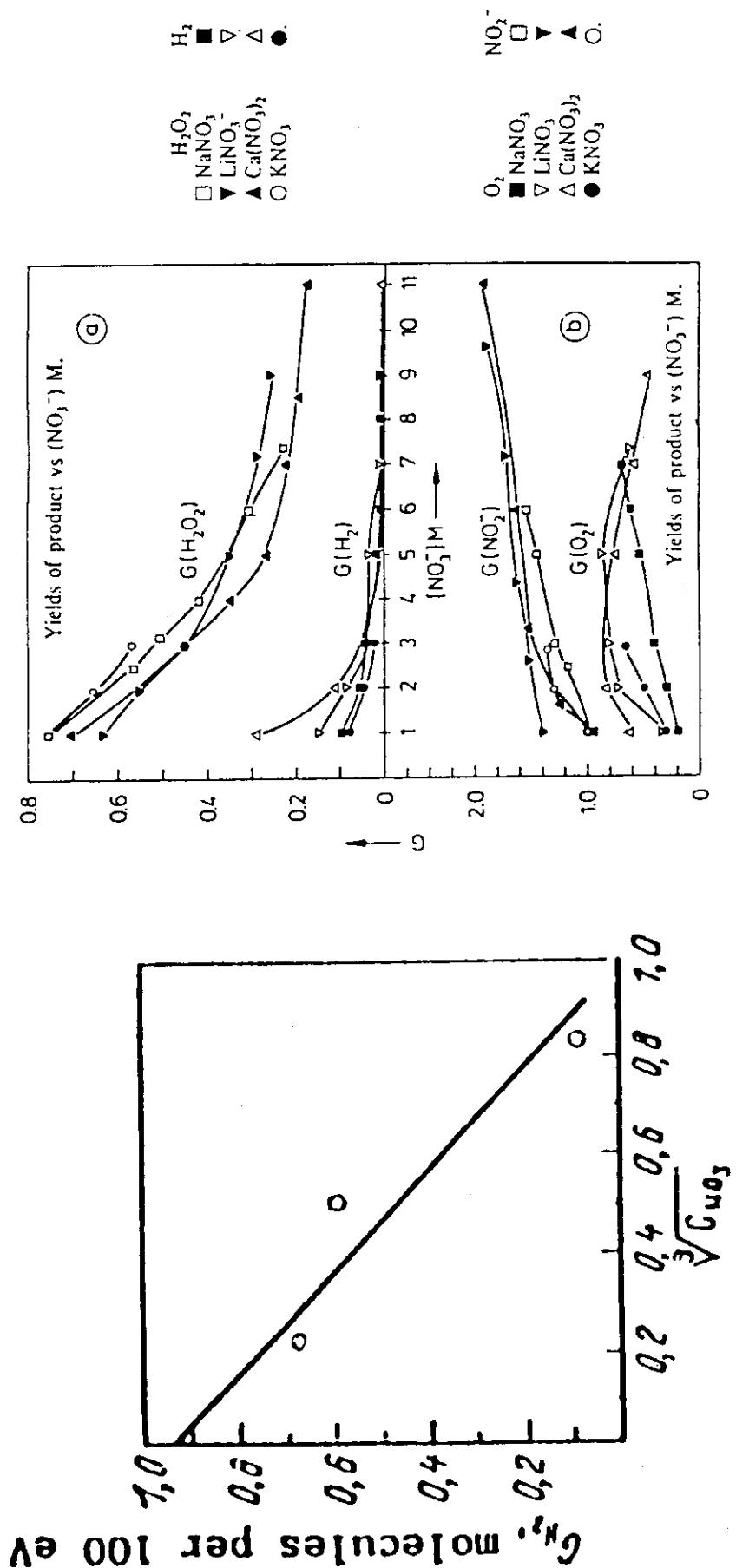


Fig. 3.5.7 Radiochemical yield of hydrogen as a function of the cube root of the  $NO_3^-$  ion concentration in the radiolysis of aqueous solutions of  $Gd(NO_3)_3$  when subjected to reactor radiation. (8)

Fig. 3.5.8 Effect of cation on radiolysis (9)

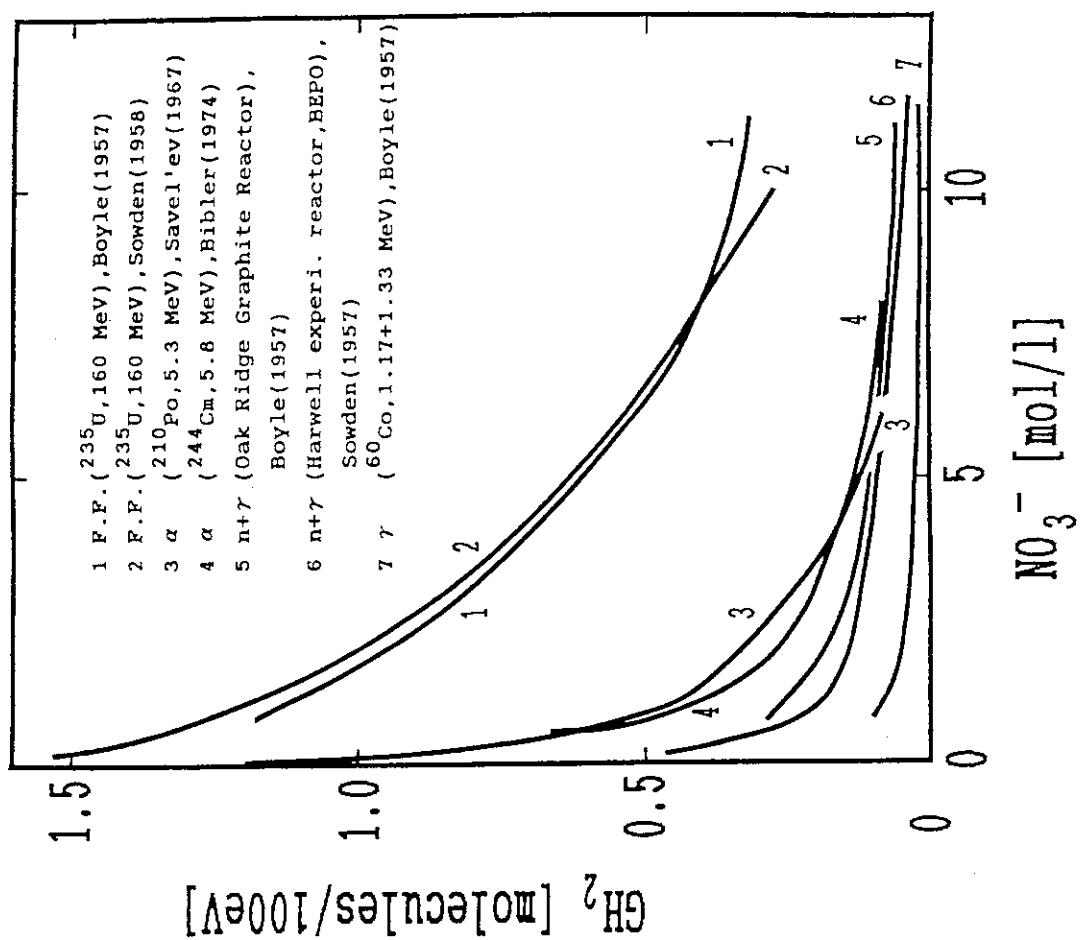


Fig. 3.5.9 Hydrogen yield as a function of nitrate concentration

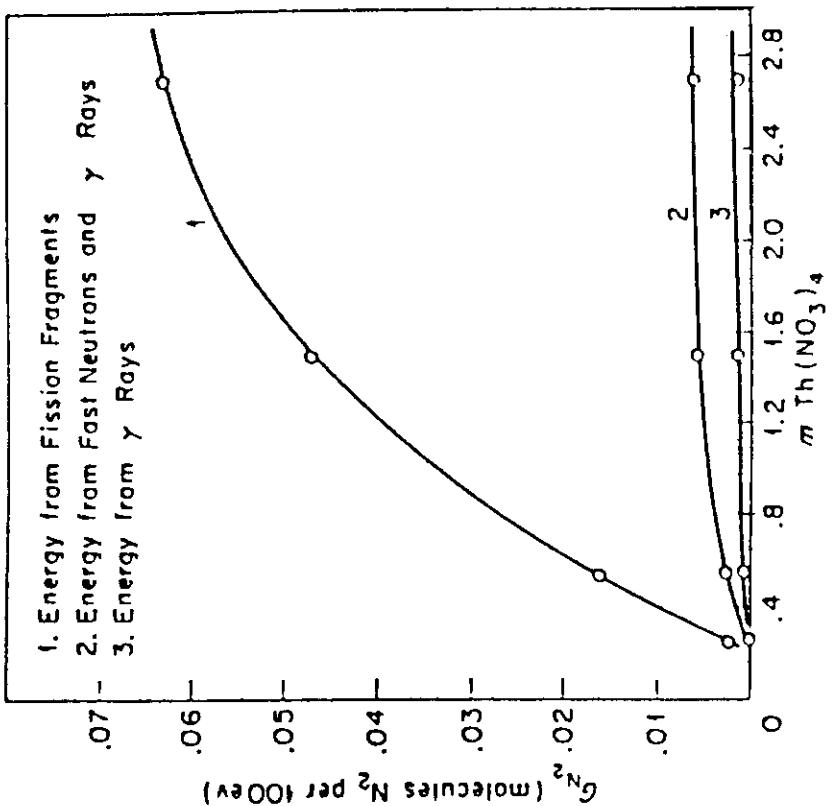
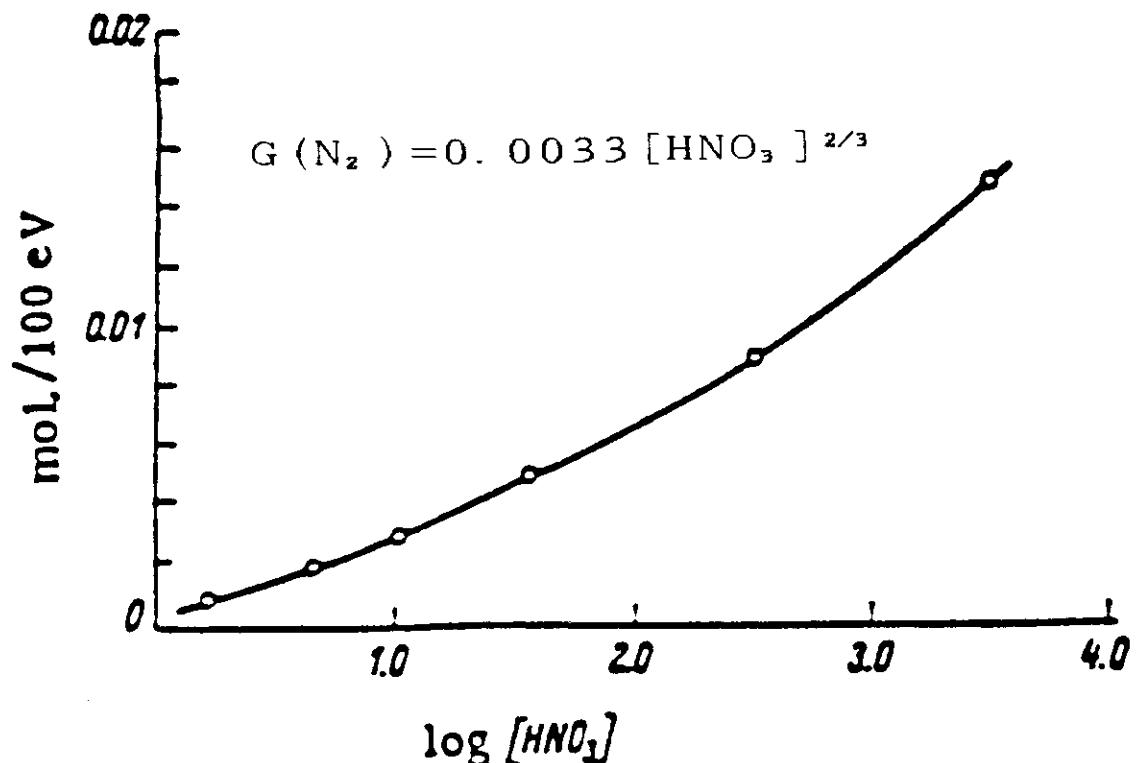
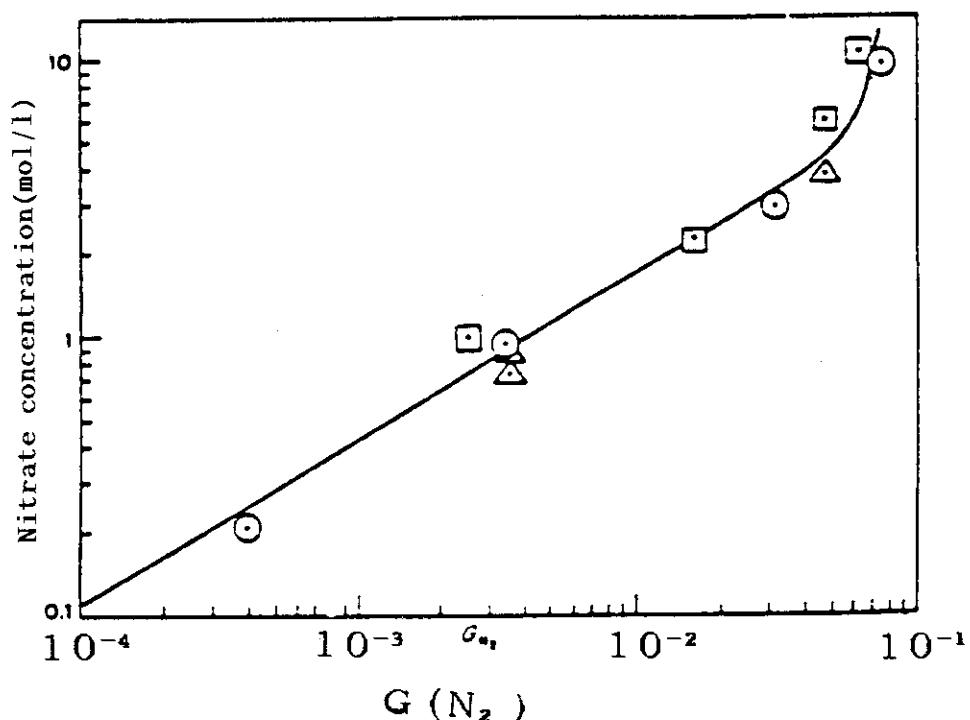
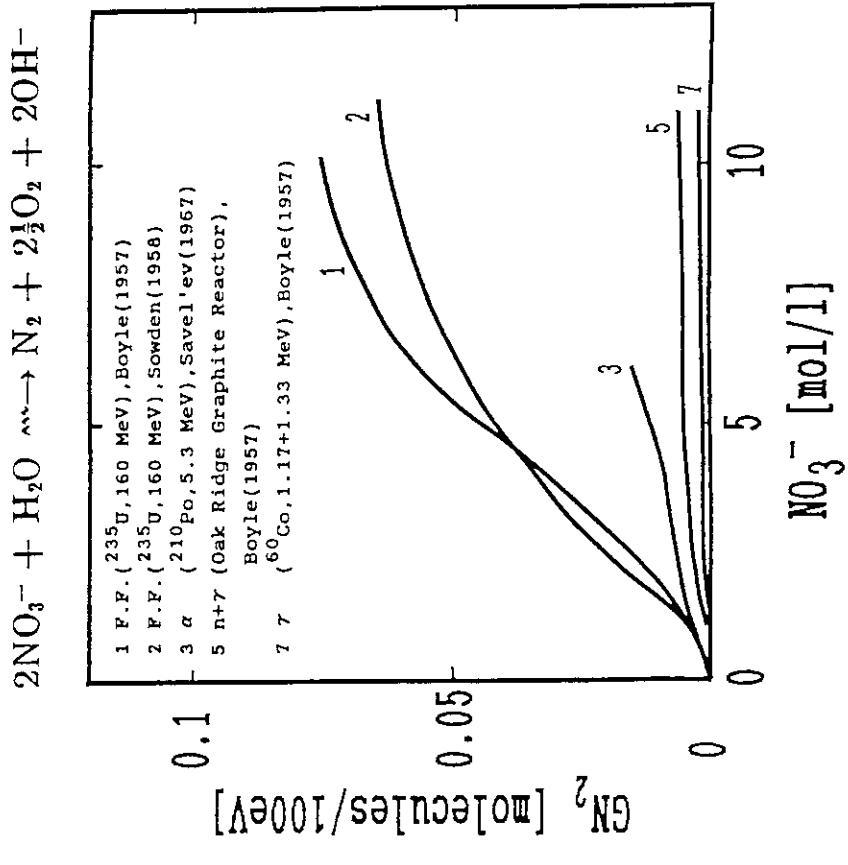


Fig. 3.5.10 Nitrogen yield as a function of  $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$  concentration for various types of radiation. (2)

Fig. 3.5.11 Radiation yields of nitrogen from nitric acid solutions<sup>(4)</sup>Fig. 3.5.12 Log-log plot of  $G(N_2)$  vs  $[NO_3^-]$ <sup>(12)</sup>



— 100 —

Fig. 3.5.13 Nitrogen yield as a function of nitrate concentration

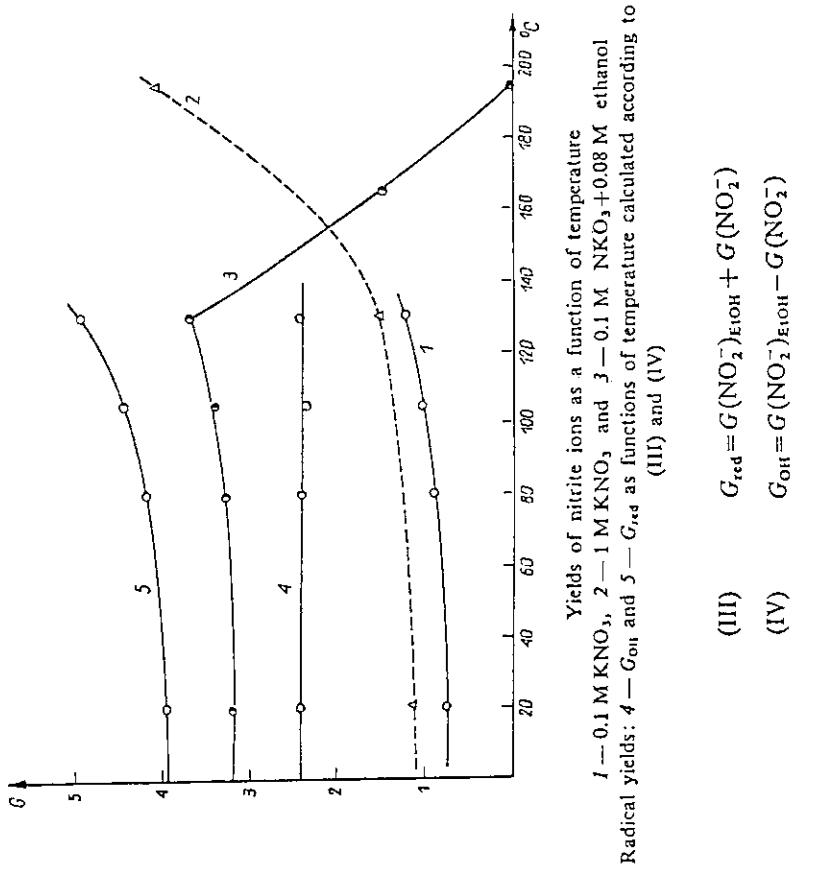


Fig. 3.5.14 Effect of temperature on radiolysis (13)

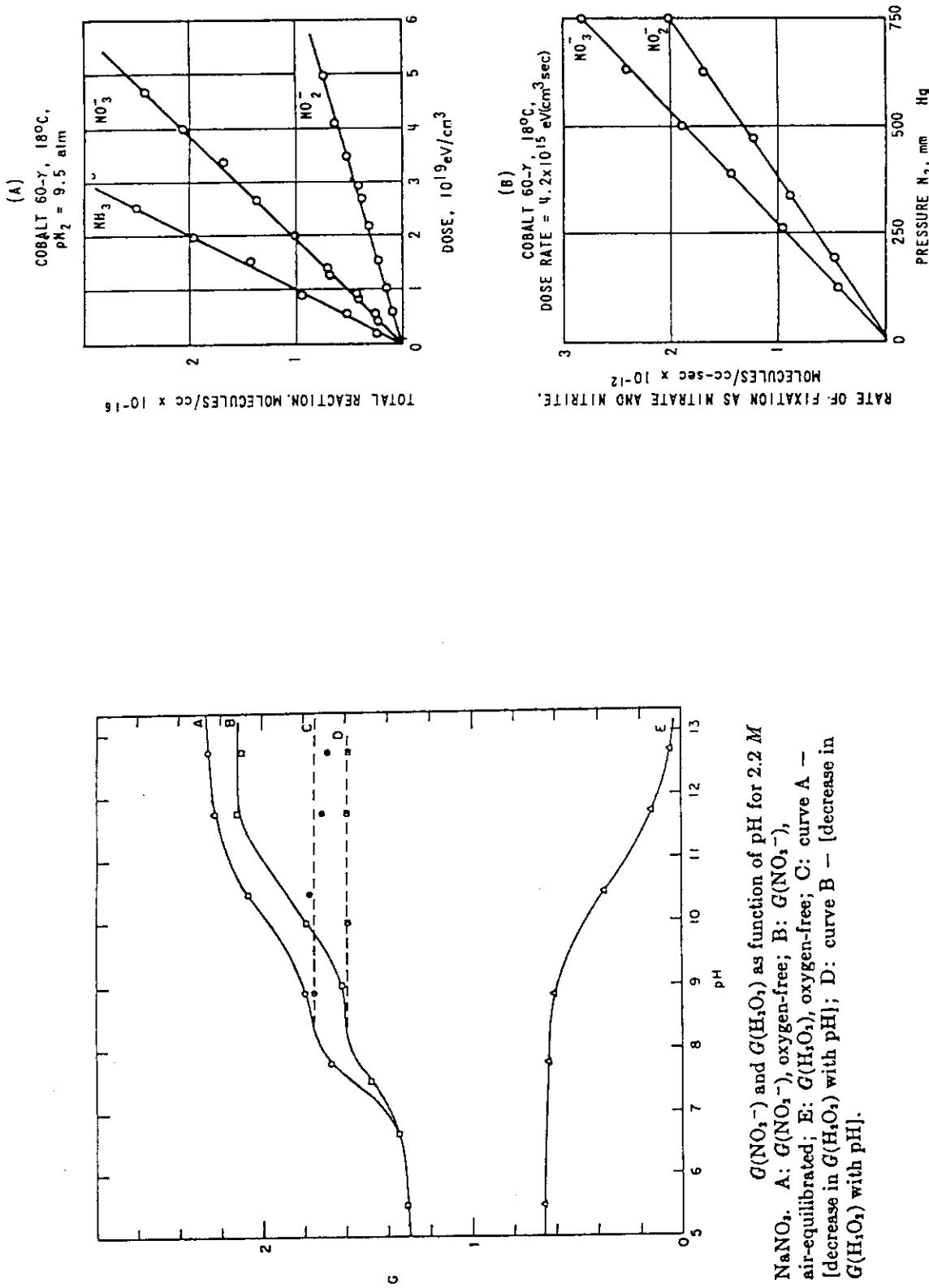
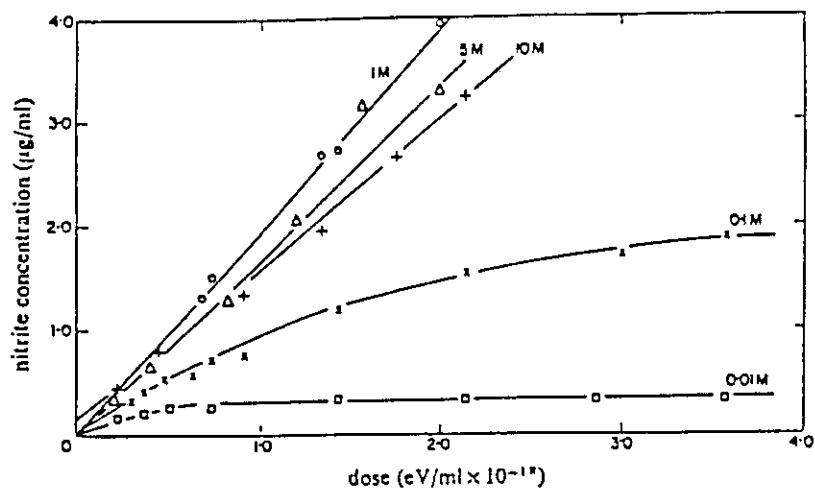
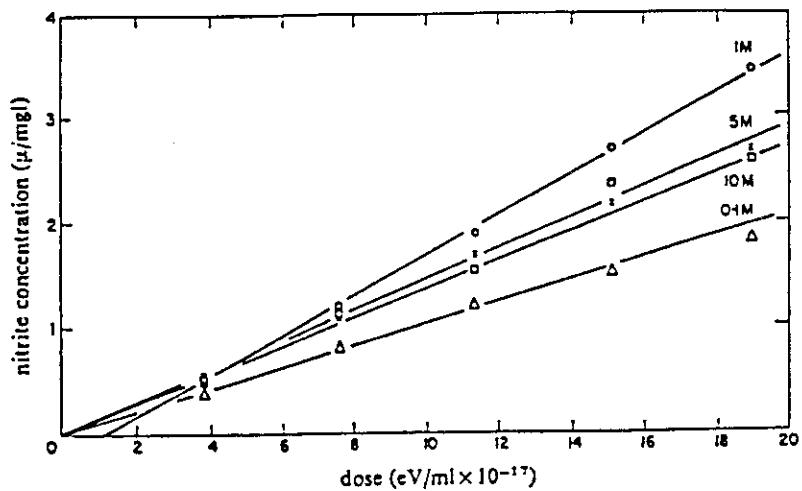


Fig. 3.5.15 Effect of pH on radiolysis (14)

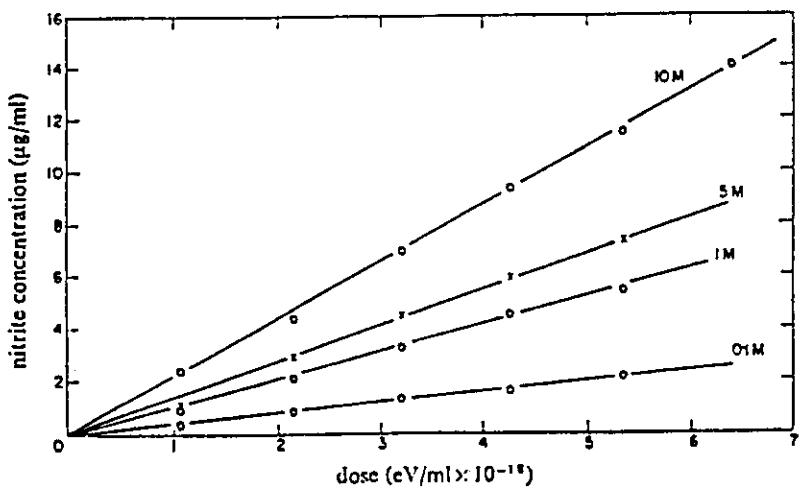
Fig. 3.5.16 Dissolved nitrogen radiation reactions (15)



Nitrite yield, gamma irradiation. Nitrite concentration ( $\mu\text{g}/\text{ml}$ ) against dose ( $\text{eV}/\text{ml} \times 10^{-18}$ ).



Nitrite yield, beta irradiation. Nitrite concentration ( $\mu\text{g}/\text{ml}$ ) against dose ( $\text{eV}/\text{ml} \times 10^{-17}$ ).



Nitrite yield, alpha irradiation. Nitrite concentration ( $\mu\text{g}/\text{ml}$ ) against dose ( $\text{eV}/\text{ml} \times 10^{-18}$ ).

Fig. 3.5.17 Effect of dose on radiation (I)<sup>(1)</sup>

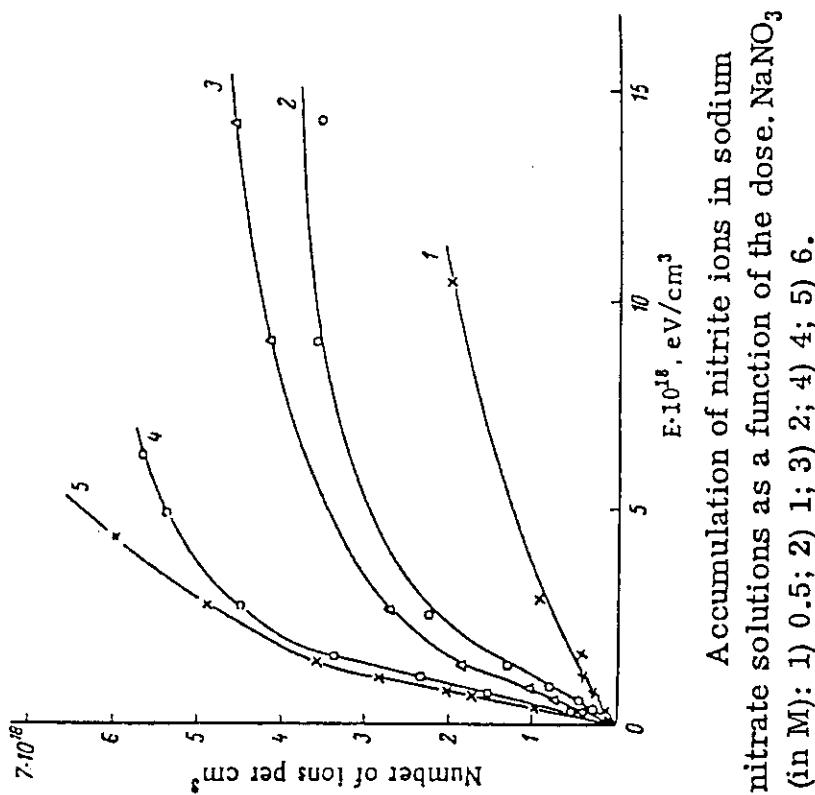
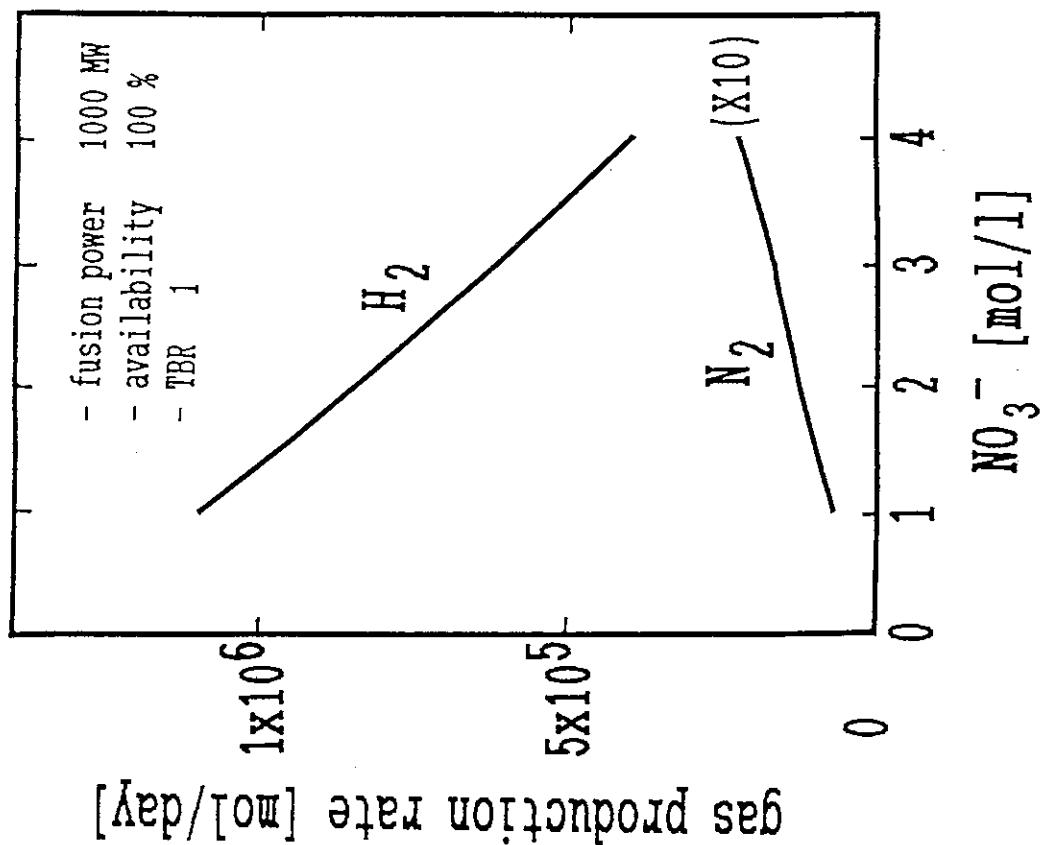


Fig. 3.5.18 Effect of dose on radiation (II) (16)

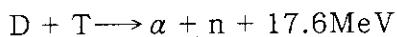
Fig. 3.5.19 Gas production rate as a function of lithium nitrate concentration in the condition of ITER blanket design

### 3.6 ITER ブランケットにおける放射線分解量の推定

#### 3.6.1 トリチウム増殖反応に基づく生成粒子のエネルギー

核融合出力 1GW, トリチウム増殖比 1とした場合の Li (n,  $\alpha$ ) T 反応で生成する全粒子の保有エネルギーの概略値を以下に求める。

##### ① 炉心内の D - T 反応

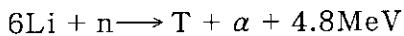


$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ GW} = 1 \times 10^9 \text{ J}$$

$$1 \text{ 秒あたりの D - T 反応数} = 3.55 \times 10^{20} / \text{s}$$

##### ② ブランケット内の Li (n, $\alpha$ ) T 反応



運動量及びエネルギー保存則より、

$$\sum E_i = \sum E_j + 4.8 \text{ MeV}$$

$$\sum m_i v_i = \sum E_j v_j$$

$$\text{ここで, } E_k = 1 / 2 m_k v_k^2$$

i = Li 原子及び中性子 n

j =  $\alpha$  粒子及びトリチウム

m 及び v は、粒子の質量と速度である。

水溶液中のリチウム及び中性子（熱化されているとする）のエネルギーは極めて小さい ( $v_i = 0$ ) とすると、 $\alpha$  粒子及びトリチウムのエネルギーはそれぞれ以下の値となる。

$$E_\alpha = 2.06 \text{ MeV}$$

$$E_T = 2.73 \text{ MeV}$$

以上から、毎秒あたりのブランケット内の各粒子の全保有エネルギーは、

$$E_{\alpha, \text{total}} = 7.31 \times 10^{26} \text{ eV/s}$$

$$E_{T, \text{total}} = 9.73 \times 10^{26} \text{ eV/s}$$

$$E_{\text{total}} = 1.70 \times 10^{27} \text{ eV/s}$$

#### 3.6.2 ITER ブランケットにおける放射線分解ガス量の推定

硝酸リチウムブランケットをITERに適用した場合の水素、窒素の生成量を以下に推定する。ここで、次のような仮定をおく。

① ITER の核融合出力、稼働率及びトリチウム増殖比 : 1GW, 100 %, 1

② 硝酸リチウム塩濃度 : 1~4 mol/l

③ トリチウム及び $\alpha$  粒子の G 値は等しいとし、Fig.3.5.9 及び Fig.3.5.13 に示したデータを使用する。

④ 放射線分解に及ぼすその他の影響因子に関するデータは、不確定要素が多いのでここでは考慮しない。

以上の仮定に基づいて計算した結果を Fig.3.5.19 に示す（図中、窒素の値は、 $\times 10$  としている）。

る)。水素及び窒素の生成量は硝酸イオン濃度により変化するが、例えば、 $4\text{mol}/\ell$  の濃度の場合一日あたりのガスの生成量は水素で  $4 \times 10^5$  モル、窒素で  $2.2 \times 10^4$  モルとなる。これらのガスはトリチウム (ITER ブランケットの増殖速度: 150g/日) を随伴しており、標準状態の気体の体積に換算してそれぞれ  $9 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ H}_2/\text{日}$ ,  $5 \times 10^2 \text{ m}^3 \text{ N}_2/\text{日}$  という膨大な量のトリチウム含有ガスの処理が必要になる。また、放射線分解で失われる硝酸は約 1500kg/日であり、水溶液ブランケットの硝酸濃度を維持するために同量の硝酸を補給しなければならない。

一方、これらの放射線分解生成ガスは、気泡を形成してブランケット冷却水を混相化し冷却効率の低下という重大な問題を引き起こす可能性もある。この対策としては、水溶液中での再結合反応の促進や水素、窒素に対する水溶液の溶解度の増加といった方法が提案されている<sup>(16), (17)</sup>が、十分なデータに裏付けられたものではない。ちなみに、ITER の水溶液ブランケットの設計では、トリチウム回収のための一日あたりの水溶液処理流量は  $2.4 \times 10^6$  モル/日であり、水溶液中の水素濃度は  $270 \ell/\text{kg} - \text{水溶液}$  となる。一方、加圧下における気体の水に対する溶解度データ (Table 3.5.3) から、温度  $100^\circ\text{C}$  の水の水素溶解度は 100atm, 200atm のときそれぞれ 1.8 及び  $3.54 \ell (0^\circ\text{C}, 1\text{atm})/\text{kg} - \text{H}_2\text{O}$  と求められ、冷却水を単に加圧するだけでは水素気泡の発生は防止できないことが分かる。

### 3.7 まとめ

水溶液ブランケットにおいて特に問題になるとを考えられる構造材の腐食及びリチウム塩水溶液の放射線分解について広く文献調査し、データベースの整理を行った。さらに、これらの知見及びデータに基づき、ITER ブランケットに硝酸塩水溶液ブランケットを適用した場合の放射線分解量を推定した。

腐食現象は、溶液の濃度、温度、pH、溶存酸素、アルカリの種類、溶液の流速、金属の表面状態、残留応力、及び放射線照射等の様々な因子の影響を受けることがかなり定量的に分かっているが、発電用ブランケットに要求される高温 ( $200\sim300^\circ\text{C}$ )、高圧 (150気圧) 条件に対応するリチウム塩水溶液の腐食に関するデータは皆無に近い。今後このブランケット方式を検討するためには、まずこのようなデータの蓄積が不可欠と判断される。本検討では、取り上げなかったが、電磁場内を電解質溶液が流れる場合には、配管やブランケット構造体を構成するステンレス鋼の電気化学的腐食が促進されると考えられるので、セラミックコーティング等の内面絶縁が必要になると思われる。

現在最も有望なりチウム塩である  $\text{LiNO}_3$  水溶液の放射線分解による水素ガス、窒素ガスの生成速度は、極めて大きい。これらの生成ガスは増殖されたトリチウム及び水溶液の飽和蒸気を随伴することから、トリチウムの処理・回収には水素防爆を考慮した大処理量気水分離を含む複雑なプロセスが必要になると考えられる。これらプロセスは、在来の化学工学プラント技術で対応できると考えられるが、十分な実証試験が前提となる。