

第15回若手科学者によるプラズマ研究会
(平成24年3月14 - 16日、那珂核融合研究所)

原型炉に向けた 先進ブランケットの研究開発

特に**溶融塩 Flibe**を中心に

核融合工学研究プロジェクト総主幹

相良明男

核融合科学研究所

H22~核融合工学研究プロジェクト **炉設計とR&D**

核融合工学プロジェクト実施体制

高密度プラズマ物理、高温プラズマ物理、
プラズマ加熱物理、装置工学・応用物理、
核融合システム、核融合理論シミュレーション、
所外共同研究

超伝導マグネットグループ: 今川主幹 / タスク及びサブタスク

柳	大型強磁場導体試験設備	柳、三戸
	CIG導体とコイル巻線	尾花、今川、菱沼
	間接冷却導体とコイル巻線	高畑、田村、
	高温超伝導導体とコイル巻線	柳、三戸
	電磁力支持構造	田村、今川
岩本	クライオスタット	田村
	低温システム	濱口、岩本
	バスライン・電流リード	山田修、尾花
	コイル電源	カ石、山田修

炉内機器グループ: 室賀主幹 / タスク及びサブタスク

田中照也 (東北大大洗との 双方向共同研究 含む)	遮蔽ブランケット	田中照、菱沼、 長坂、近藤正
	増殖ブランケット	長坂、菱沼、 近藤、田中照
	熱・水素同位体回収システム	近藤、室賀、 長坂、菱沼、 田中照
田村	第一壁	廣岡、芦川、 長坂、加藤大
	真空容器	田村、増崎
	ダイバータ	増崎、時谷、 村上泉、加藤 大、坂上、
	遠隔保守	西村、芦川、 大館、成嶋

工学研究推進会議
相良、
今川、室賀、
及びタスクリーダー

・ヘルカル原型炉
概念設計
・ヘリカル原型炉
基本設計

・実規模超伝導
導体試験研究
・ヘリカル巻線工
学研究

・液体ブランケット
長寿命化試験
・高磁場下の伝
熱流動工学研究

・低放射化材の
高温化試作研究
・耐熱化表面改
良工学研究

・3次元形状タイ
パータ試作研究
・水素同位体低
減LHD照射研究

・微量トリチウム
除去回収研究
・実時間検出機
器開発研究

炉システム設計グループ: 相良総主幹 / タスク及びサブタスク

設計統合 相良	課題抽出と全体企画	相良、宮澤、後藤拓
	ヘリカル原型炉概念設計	後藤拓、宮澤、相良
建屋配置設計 後藤拓	配置設計と工程	西村新、後藤拓
	炉建屋設計	田村、後藤拓
電源・発電設備 カ石	発電・電力供給システム	カ石、山田修
	送電・水素製造システム	山田修、菱沼
トリチウム燃料シ ステム 田中将 (富山大との 双方向共同研究 含む)	トリチウム処理システム	田中将
	安全管理	河野
	生体遮蔽・放射化見積	山西
	法整備・許認可申請	西村清
運転制御 御手洗(東海大)	安全解析・制御システム	宇田
	燃焼制御	御手洗修
	データ処理	中西
炉心プラズマ 宮澤	高性能プラズマ	宮澤、後藤拓、成嶋
	TCT効果・α粒子損失	横山、村上定義(京大)
	立ち上げシナリオ	御手洗修
プラズマ加熱 津守	NBI	津守、長壁
	ECH	伊神、吉村、出射(九大)、 下妻
	ICH	笠原、斎藤、武藤
燃料供給 坂本	ペレット	坂本
	ガスパフ	宮澤
計測 磯部	磁気計測	榊原
	中性子計測	磯部
	ダイバータ計測	増崎
	分光計測	後藤基
	干渉計/反射計	田中謙、徳沢、秋山
	トムソン散乱	山田一
	荷電交換分光	吉沼

2010.5.17現在

1. はじめに

1. 1940年代

- 米国の液体燃料原子炉(MSR)
 - 2万時間を超える循環運転実績
 - 大気漏出での反応性が低い、
 - 強磁場下でのMHD圧損が低い、
 - トリチウム溶解度が低い、
 - 低蒸気圧での高温運転
- 米国でのブランケット比較選定研究BCSS
 - 安全の魅力では傑出するがデータ不足、
 - 核融合特有の新たな理工学研究が必要

2. 1990年代

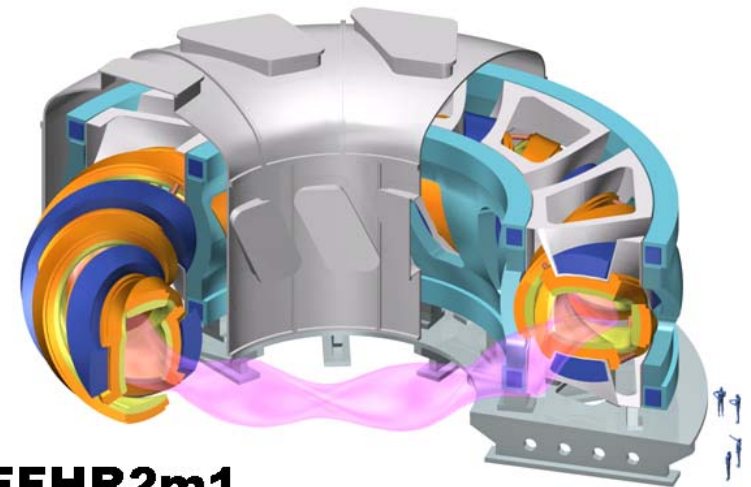
- ヘリカル炉設計FFHRでの採用、米国でのAPEX

3. 2001-2006

- 日米プロジェクトJUPITER-IIでのR&D

4. 現在～

- 国内共同研究によって物理工学成果の質と量が飛躍的に向上
- 主要課題
 - 高プラントル数流体の伝熱促進、
 - トリチウム透過抑制と回収技術
 - トリチウム増殖に伴うTFによる材料腐食の抑制、



FFHR2m1

2. 伝熱特性の改善実験研究 (東北大 橋爪、京大 功刀、他)

<目的>

- Flibeシミュラントを用いた伝熱試験から、高温・高Pr数流体である溶融塩Flibeに適した伝熱促進体を開発すること。

<実験>

- 溶融塩強制循環ループTNT loop (Tohoku-NIFS Thermofluid Loop)
- 高温溶融塩取り扱い技術ノウハウの取得・蓄積

<分かったこと>

- 高温環境の溶融塩に対しても熱と流れの相似則が成立する
- 金属球充填管(SPP: Sphere-Packed Pipe)これにより、低流速条件で目標熱伝達率を達成
- PIV可視化実験とサーモグラフィによる流動構造の解析が進展

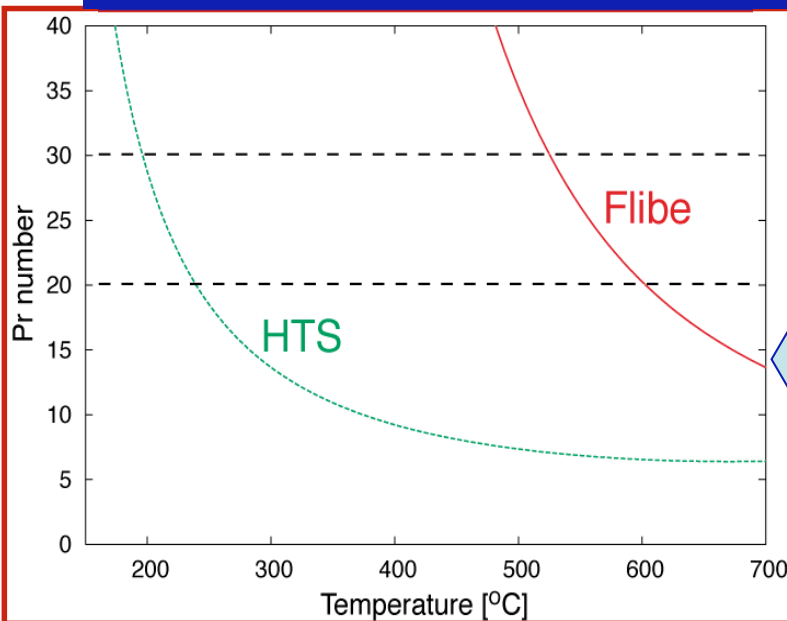
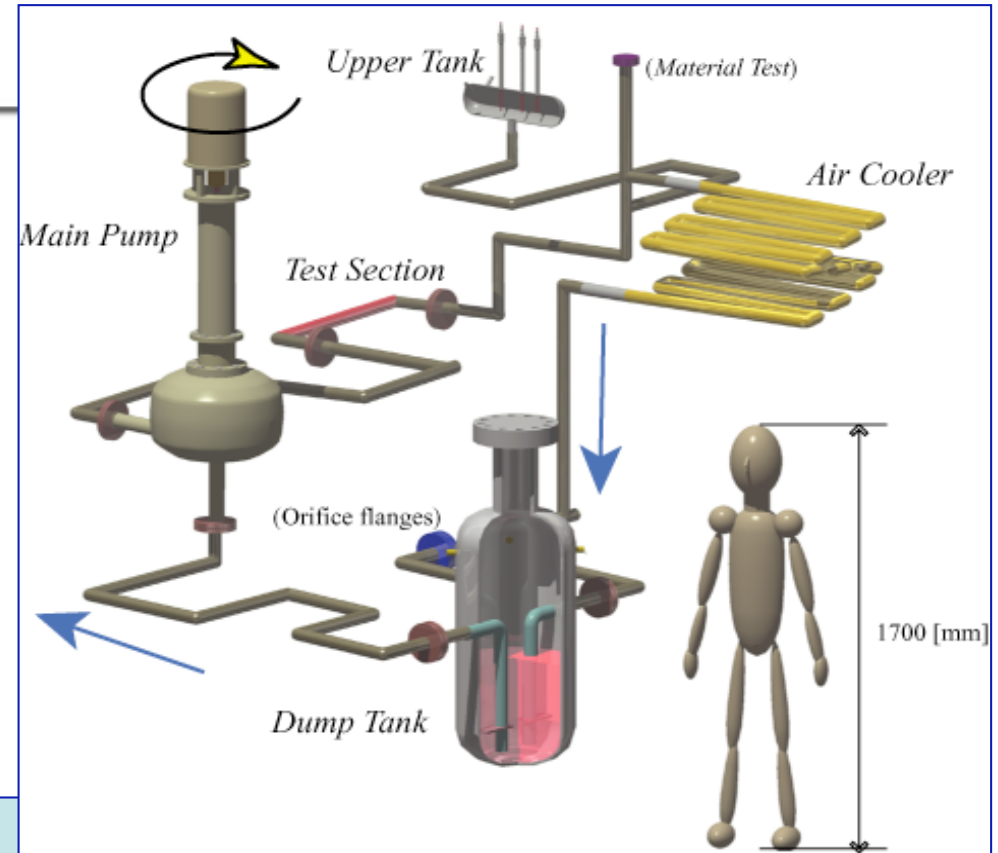
<今後の課題>

- 球と管壁の接触点近傍におけるホットスポットの緩和
- 磁場下における伝熱データの取得が必須
- 混合物析出による熱抵抗層の評価と保守

Tohoku-NIFS Thermofluid Loop for molten salt (1997~) has accumulated high Temperature Device Technology

TNT loop

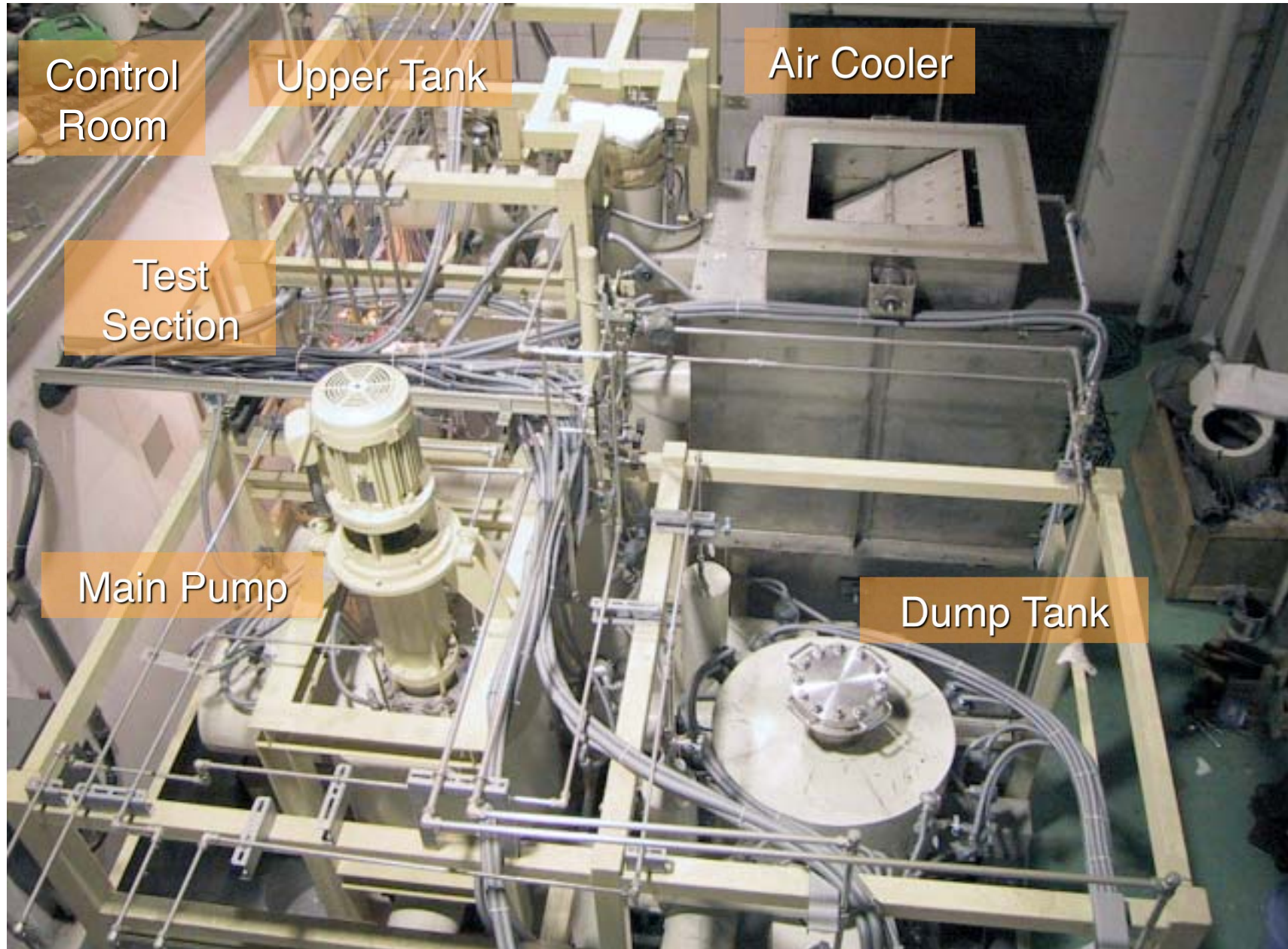
- $u = 8 \sim 20$ L/min
- $T < 600^\circ\text{C}$
- $V \sim 0.1\text{m}^3$
- $P < 0.7$ MPa.
- operation ~ 30 kW
- air cooler < 80 kW
- material = ss316



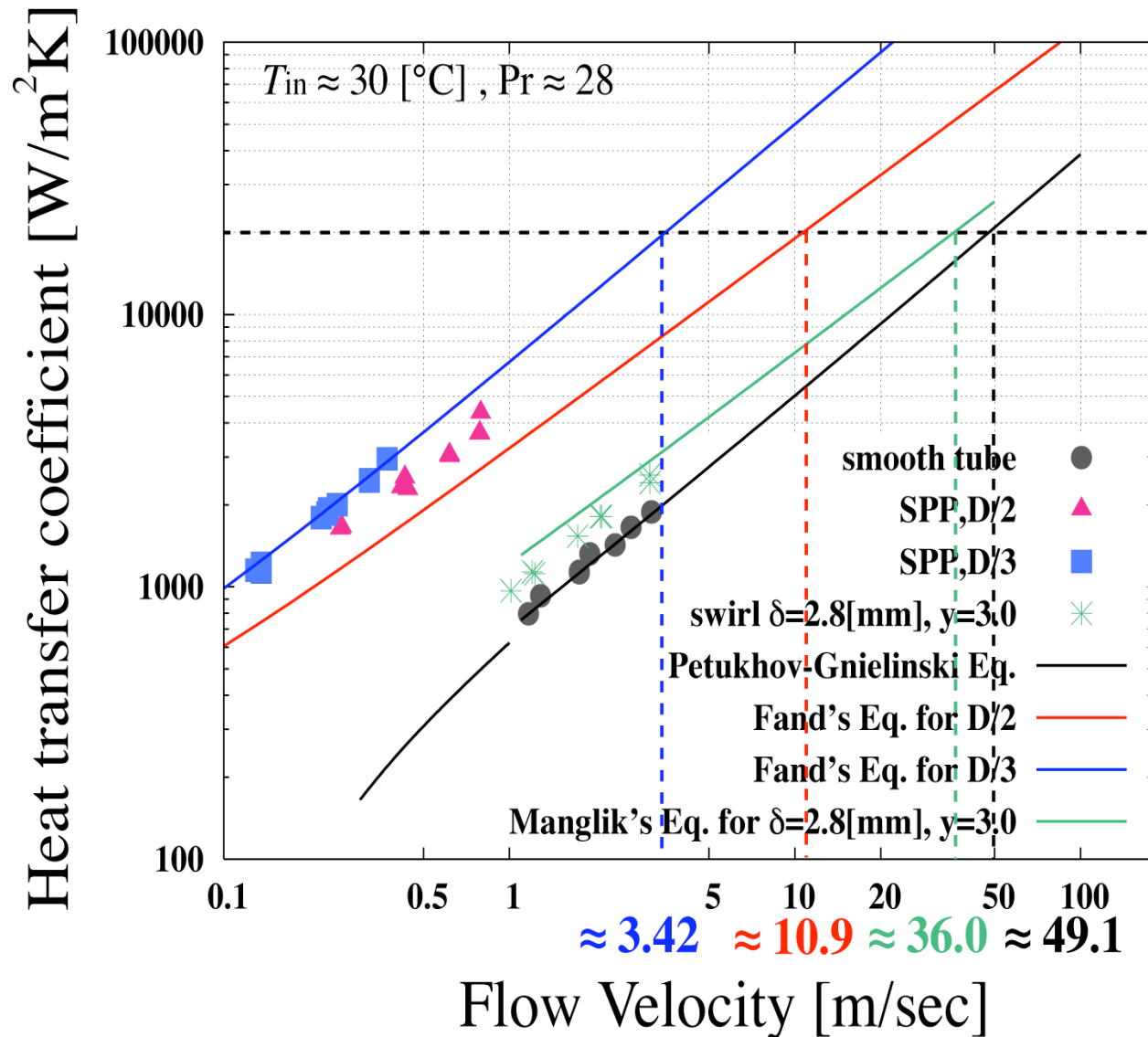
Now HTS (heat transfer salt) is used as a simulant for Flibe

HTS
 53% KNO_3
 40% NaNO_2
 7% NaNO_3
 $T_m = 142^\circ\text{C}$

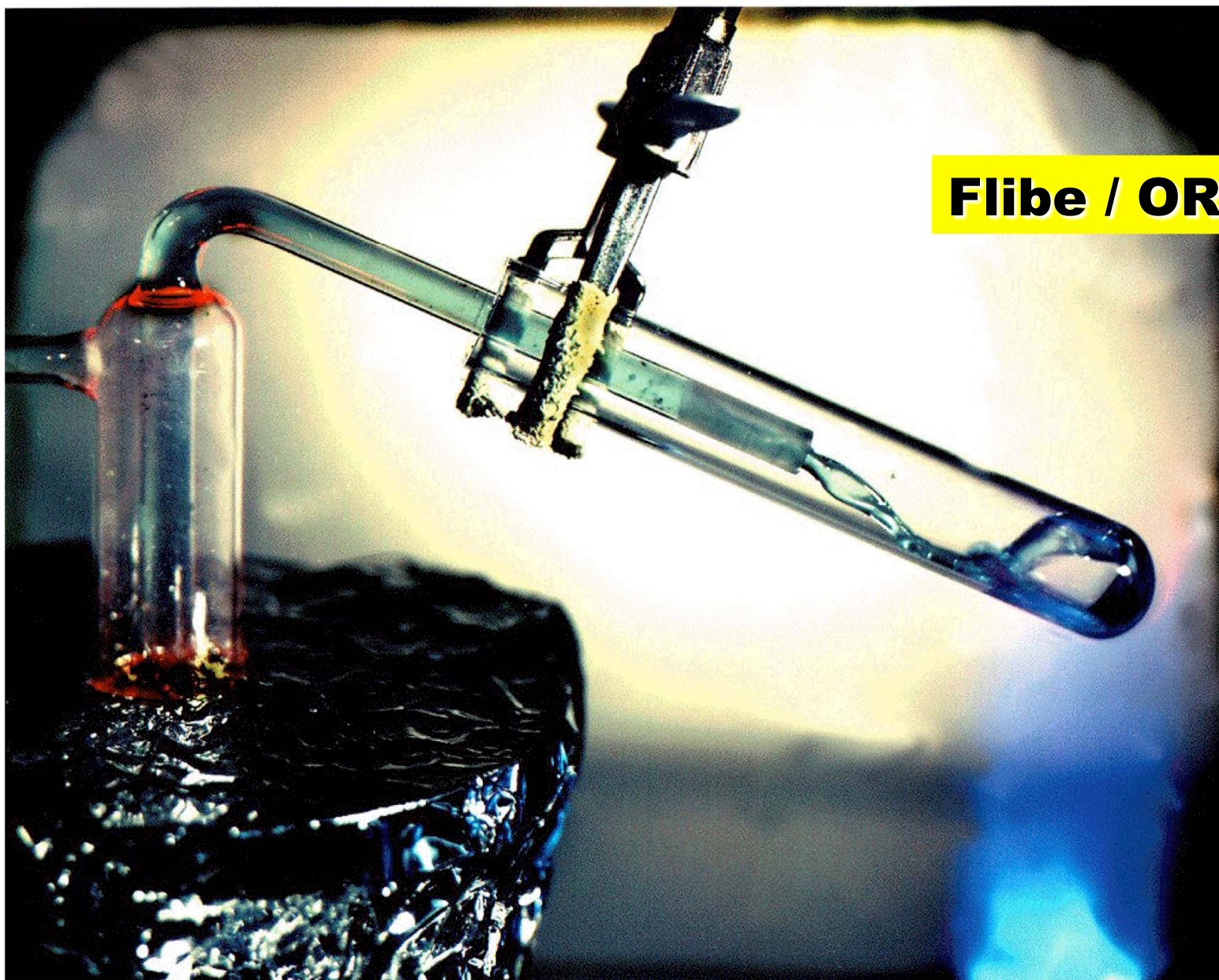
Bird's eye view of TNT



- 高温環境の溶融塩に対しても熱と流れの相似則が成立する
- 金属球充填管 (SPP: Sphere-Packed Pipe) により、
低流速条件で目標熱伝達率を達成



熔融塩Flibe(フライベ:LiFとBeF₂の混合物)



Flibe / ORNL

JAERI-memo

6047

核融合炉における放射線発熱(I)

(中性子発熱の検討)

1975年3月

相良明男*・関泰

1994年10月31日 相良

炉設計作業会メモ(10.27-28): 構造材料、約20名

基本的な合意

- (1) 斬新なアイデアを優先して、大学連合の特徴を出す。
- (2) **大学の材料研究に、これまでにないインパクトが期待できる。**
- (3) 現在は開始初期であり、長期の共同研究として進める。
- (4) トカマクと共通させつつ、材料でもヘリカルの特徴を出す。

主な論点・提案

- (1) **重照射機器の交換は必要(450 dpa は目標にしても難しい)。**
- (2) **熱媒体は複数検討(600.C の条件はクリティカル)。**
- (3) フェライト材とヘリカル装置(次回の中心テーマ)
- (4) 材料開発戦略のリアレンジ(具体的な年次マイルストーン)。
- (5) 低放射化の考え方を前倒して検討。
- (6) 概略コスト評価を前倒して検討。
- (7) 炉サイズの小型化。
- (8) 次回(11/22)までに1次案まとめる。

今後の進め方

- (1) **フリーベ仕様のFFHRを先導概念として設計を進める。**
- (2) 次回(11/22)までに1次案まとめる(松井、室賀、相良)。
- (3) 並行して材料サイドから選択概念を1つ提案し、設計を進める。
- (4) そのための複数提案を次回に1次案として提案する(松井、室賀)。
- (5) 材料開発戦略の具体的な年次マイルストーンの整理(室賀)。
- (6) 概略コスト評価の進め方を提案する(相良、本島)。
- (7) **低放射化の位置付けを暫定的に定める(次回に関)。**
- (8) 炉サイズの小型化を検討する(相良、本島)。

実験炉モジュールから原型炉を視野に入れた 液体ブランケット開発でのマイルストーン

核融合研 相良明男
 拡大核融合炉・材料研究合同委員会
 2001年7月16日
 東京弥生会館

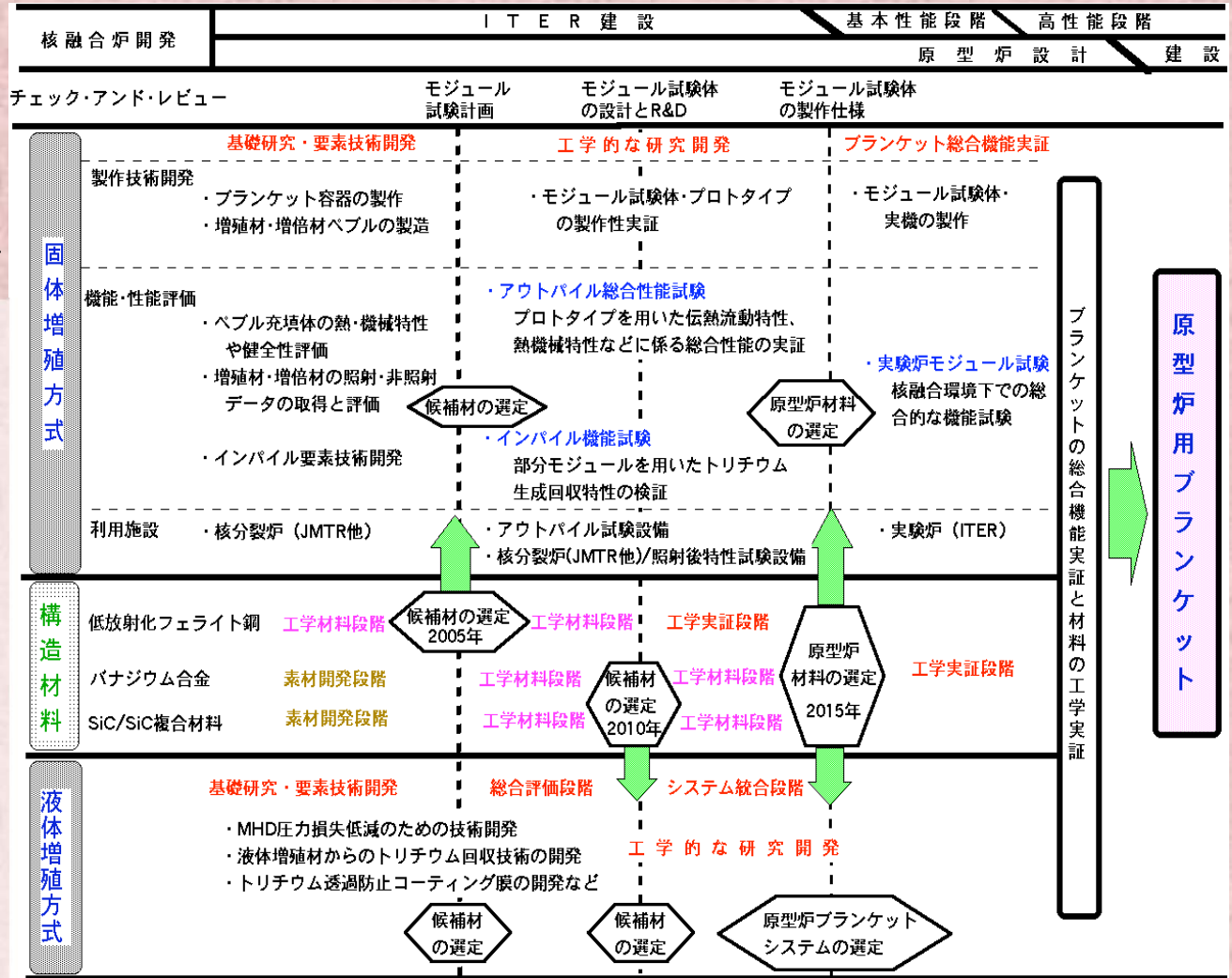
核融合会議計画推進小委員会

「核融合炉ブランケットの研究
 開発の進め方」平成12年8
 月21日より引用

学審特定研究領域推進分科会原子力
 部会「大学における核融合研究の在
 り方について」（平成12年12月
 6日学術審議会総会にて承認）
 とも整合している。

②ブランケット工学の研究の推進

・・・液体金属や熔融塩などの研究
 の広がりも出てきている。今後は、
 炉心性能の進展及び構造材料の開発
 に同期して、・・・広範な基礎学術
 領域での先進的な要素開発と、
 それらを連携した
 総合評価による材料選定、さらに
 システムとしての統合化へと段階的
 かつ計画的に研究を進めることが必要
 とされる。



注1：構造材料に関しては計画推進小委員会「中期的展望に立った核融合炉第一壁構造材料の開発の進め方について」（平成12年5月、原子力委員会核融合会議で承認）による。

注2：液体増殖方式に関しては核融合専門委員会「核融合炉工学の再構築と体系化について」（平成12年5月29日第17期学術会議運営審議会にて承認）が参考

3. トリチウム制御に関する研究

3.1 JUPITER-II成果(東大 寺井、静大 大矢、九大 深田、他)

<目的>

- Flibeの精製から物質移行挙動、Beを用いた酸化還元制御、トリチウム拡散挙動評価を明らかにすること。

<実験>

- アイダホ国立研究所(INL)のSTAR(Safety and Tritium Applied Research)で実施
- Flibeポット内にHFを通気させながら、一定時間Be金属を侵漬させ、放出HF濃度をTitrator(滴定装置)にて評価
- Beによる酸化還元制御条件でのトリチウム透過実験

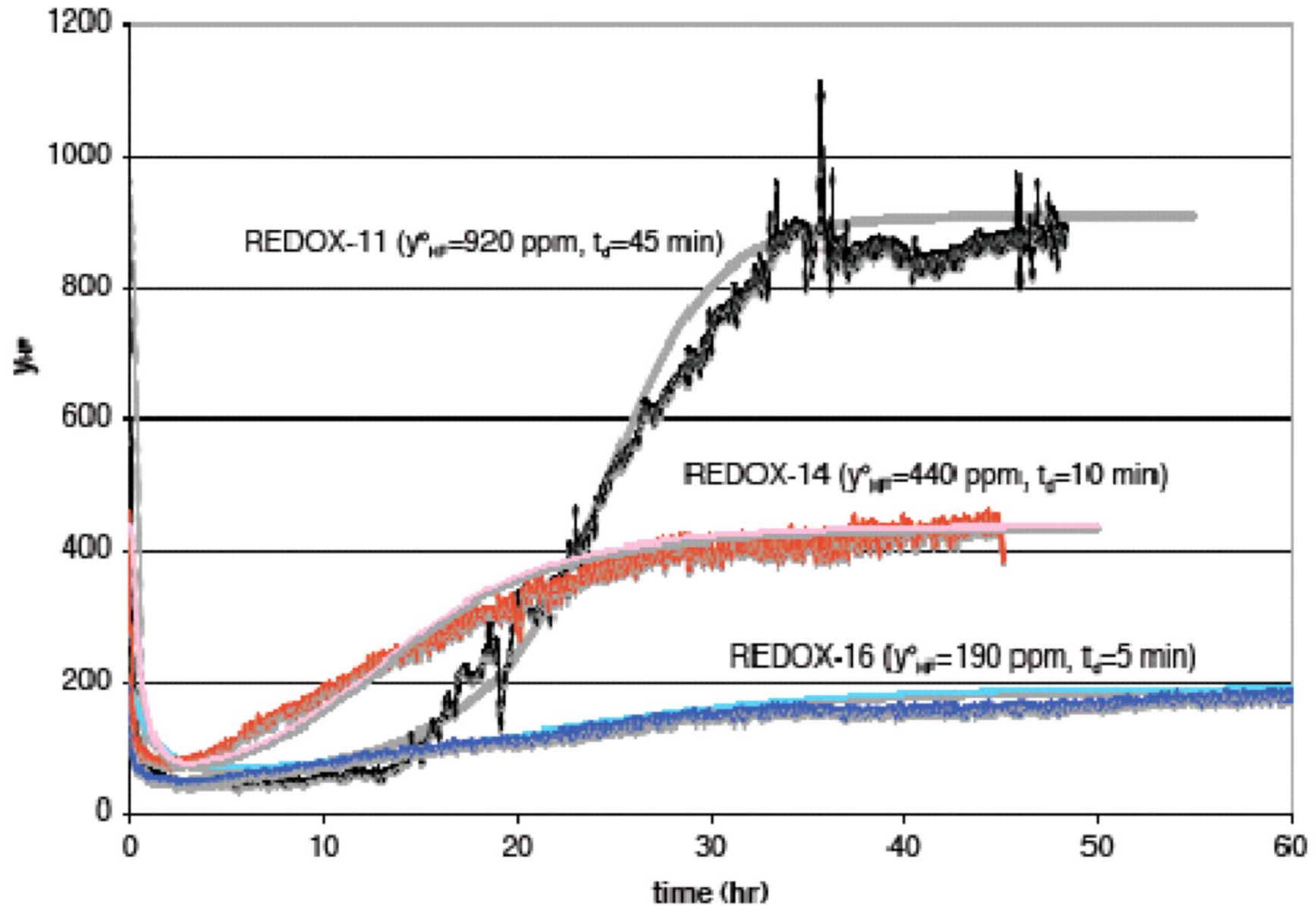
<分かったこと>

- BeによりFlibe中のTFが還元される
- 効果は溶解Be量に比例して持続する
- トリチウムは T^+ と BeF_4^- またはHTとしてFlibe中に溶解(推定)
- 拡散速度および溶解度が求められた

<今後の課題>

- 流動環境下におけるトリチウムダイナミックスの定量化
- 流動環境下における酸化還元制御の有効性の確認
- 核融合実環境下でのブランケットシステムの有効性の確認

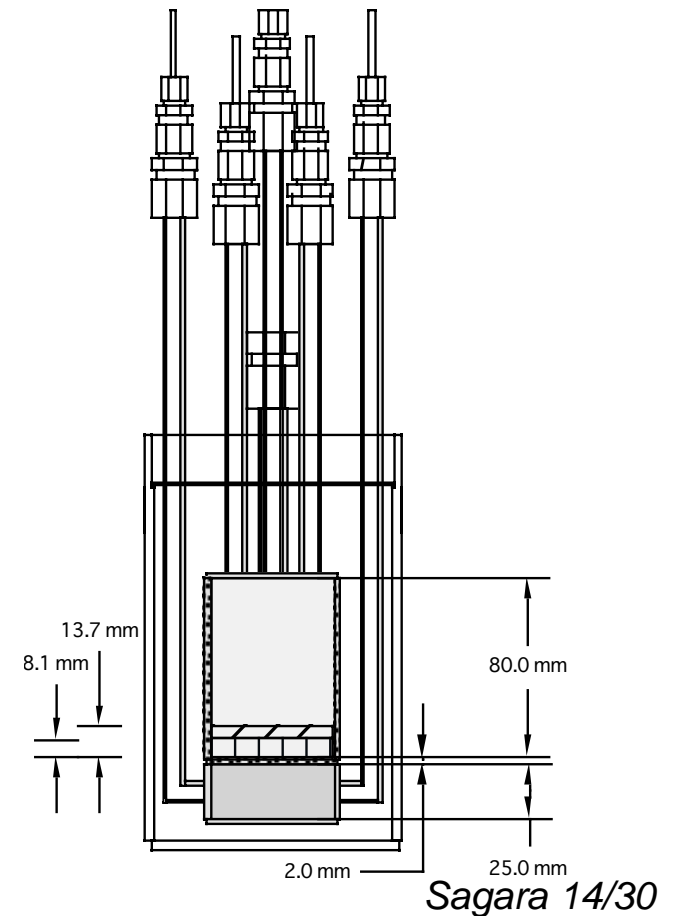
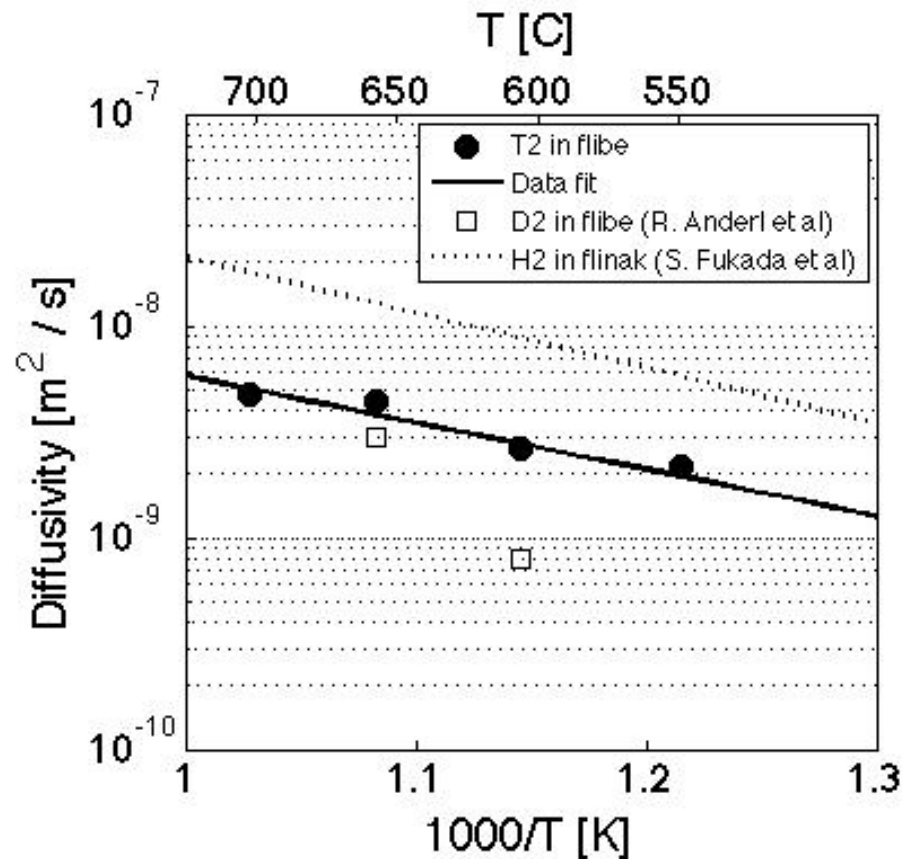
BeによりFlibe中のTFが還元される 効果は溶解 Be量に比例して持続する



トリチウム拡散挙動評価

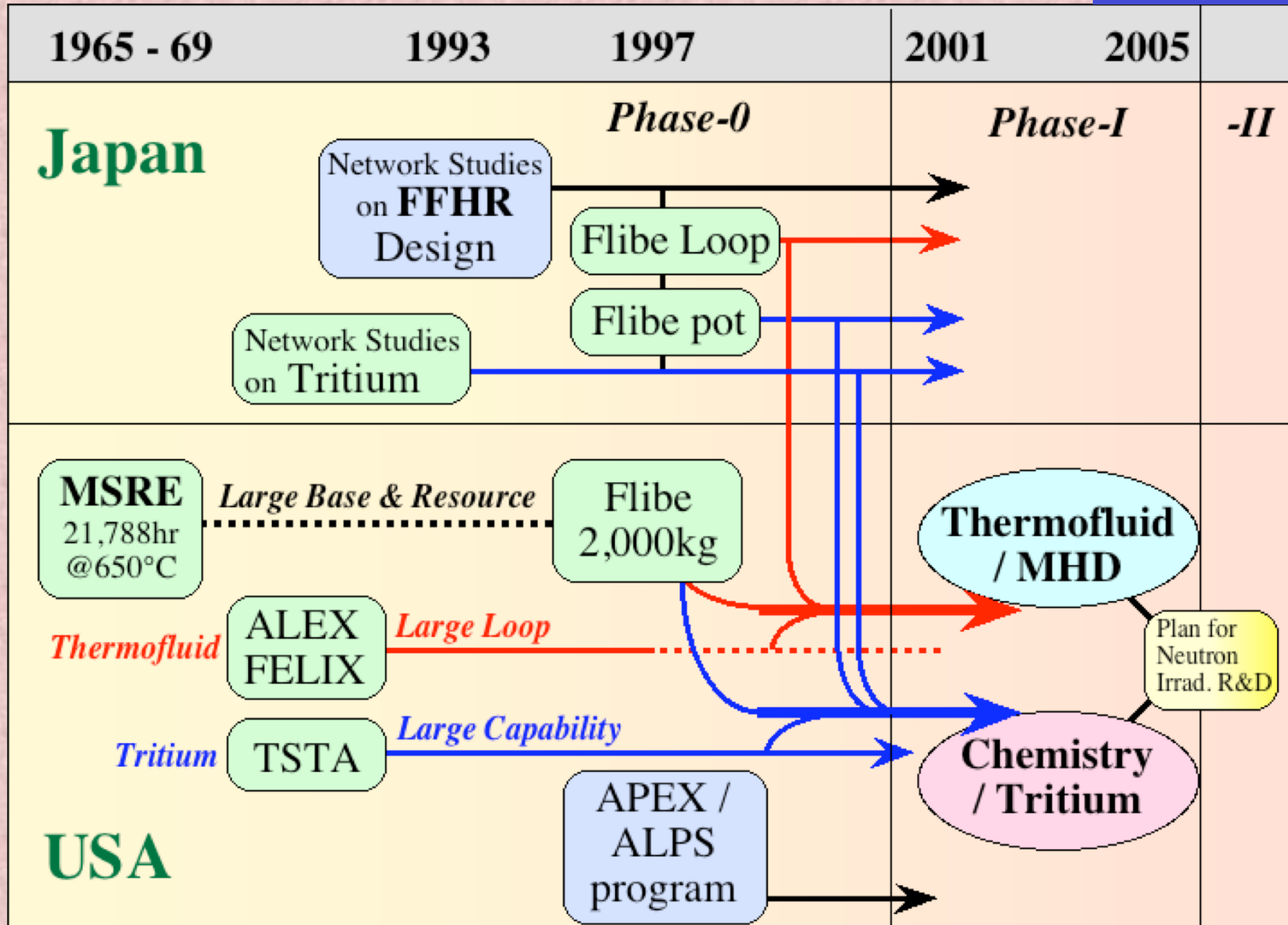
$$D_{flibe,T} = 9.3 \times 10^{-7} \cdot \exp\left(-\frac{42154}{R_g \cdot T}\right)$$

$$K_{flibe,T} = 7.892 \times 10^{-2} \cdot \exp\left(-\frac{35403}{R_g \cdot T}\right)$$



日米共同プロジェクト計画の準備状況

次期共同プロジェクト
推進小委員会
1998年12月14日、核融合研



計画の将来展望

次期共同プロジェクト
推進小委員会
1998年12月14日、核融合研

本共同プロジェクトにより

溶融塩Flibeの高い可能性が実証されれば

中性子環境下での

Flibeの有効性を実証する研究へと展開する。



具体的には

中性子照射下のFlibeと材料の両立性など、

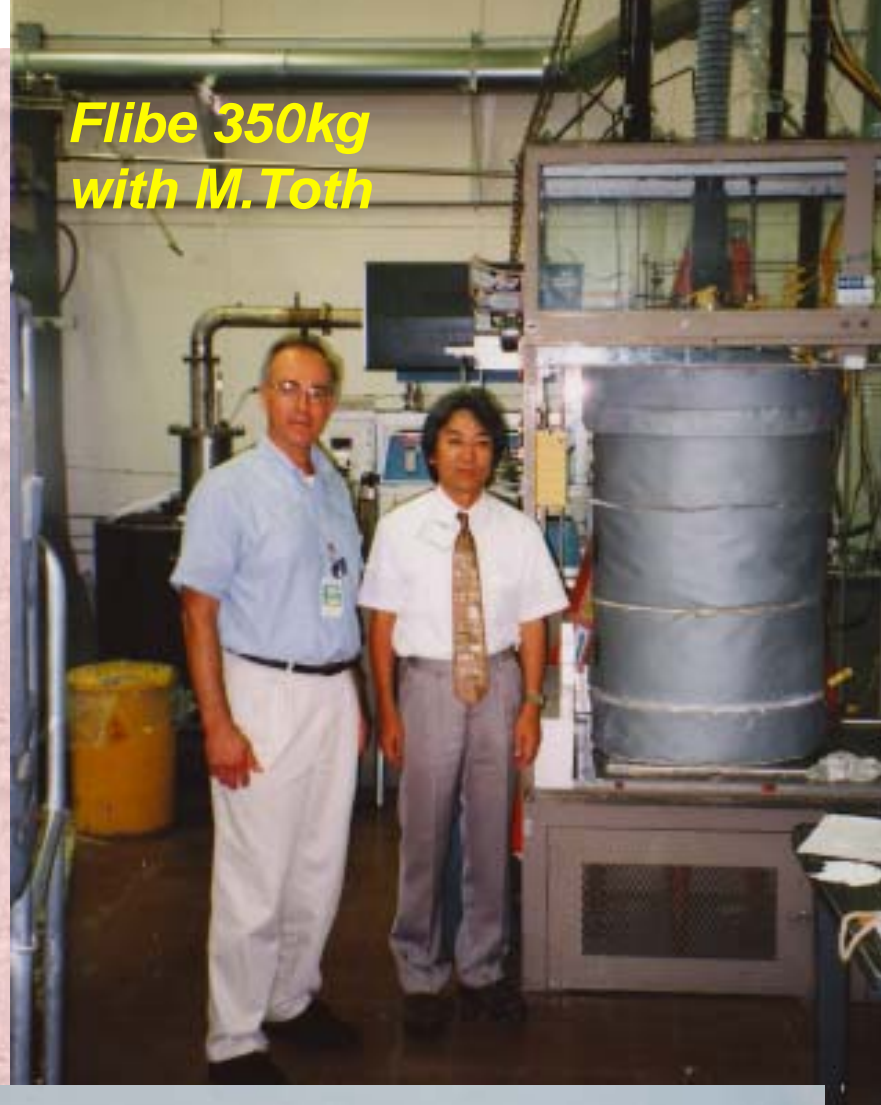
中性子照射ループによる実験研究を目指す。

**Aug. 9, 1999 @ORNL,
Photo by A. Sagara**

**Control Room
of MSRE
With J. Devan
And M. Toth**



**Flibe 350kg
with M.Toth**



**MSRE
From upper**



ORNL



FLiBe/RAF blanket, Li/V blanket, SB-He/SiC Blanket

R&D in Japan-US joint project JUPITER-II (FY'01~'06)

INEEL

1-1-A: FLiBe Handling/Tritium Chemistry



1-1-B: FLiBe Thermofluid Flow Simulation
2-2 : SiC System Thermomechanics



Japan

3-1: Design-based Integration Modeling

3-2: Materials Systems Modeling

ORNL

1-2-B: V Alloy Capsule Irradiation
2-1 : SiC Fundamental Issues, Fabrication, and Materials Supply
2-3 : SiC Capsule Irradiation



UCLA



ANL
(2001)

1-2-A: Coatings for MHD Reduction

3. トリチウム制御に関する研究

3.2 回収系の概念設計(九大 深田、他)

<目的>

- トリチウム透過を10Ci/day程度に抑えるには、トリチウム回収系と熱交換器、BeによるRedox制御器のすべてを適切に設計する必要がある。

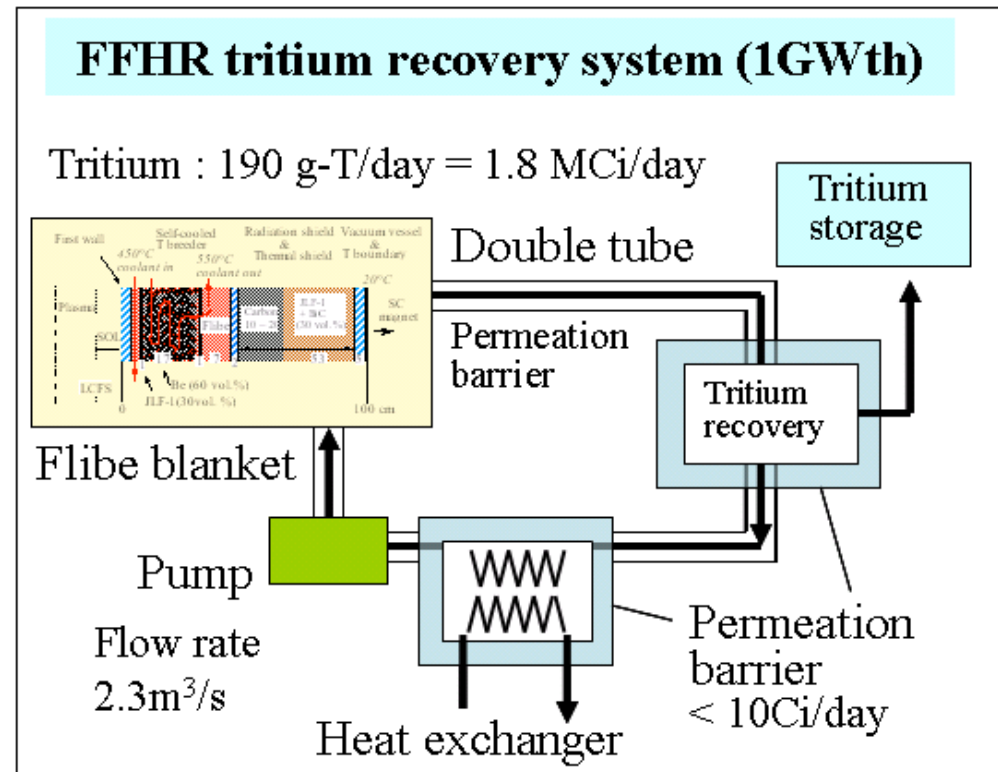
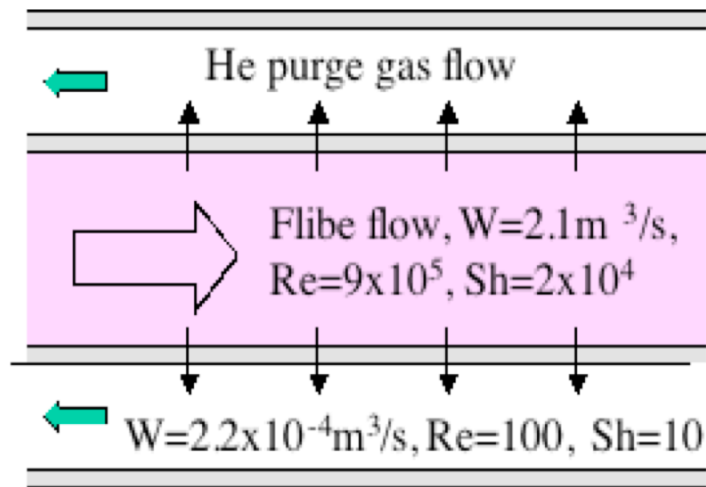
<分かったこと>

- Flibe模擬流体(Flinak)では H_2 は分子状で透過し、よくRedox制御されたFlibeと相似である

<今後の課題>

- 高いトリチウム回収率を達成するためには、FlibeとHeガスとの接触を保つ向流抽出塔を十分な精度で設計すること
- Flibe系の向流抽出塔での実験データの取得
(気泡-Flibe間の界面現象を十分に精度良く求めるため)

With barrier of **He sweep gas** ($W=220\text{cc/s}$) and/or **Flibe stagnant** ($t=0.5\text{m}$) in double wall (100m^2), the leak level is **$1.6\text{Ci/day} < 10\text{Ci/day}$** .



	(1) $\alpha = 1$ (no by-pass)	(2) $\alpha = 1$ (Flibe barrier)	(3) $\alpha = 0.1$
T generation rate in blanket	1,800kCi/day	1,800kCi/day	1,800kCi/day
T concentration in Flibe	5×10^{-4} wppm (1kPa)	5×10^{-4} wppm (1kPa)	5×10^{-3} wppm (10kPa)
In T recovery system	1,765kCi/day	1,766kCi/day	1,441kCi/day
T leak through line from blanket to TRS	1kCi/day	1Ci/day	10kCi/day
T leak through secondary flow	34kCi/day	34kCi/day	340kCi/day
T Leak from heat exchanger	10Ci/day	10Ci/day	9kCi/day
T leak through line from HX to blanket	10Ci/day	10Ci/day	30Ci/day
T inventory in sus 316	8kCi/ton	8kCi/ton	30kCi/ton

Flibe模擬流体 (Flinak) ではH₂は分子状で透過し、 FlibeがよくRedox制御された状態と相似であることが分かった

Flinak-H₂ (D₂) permeation experimental apparatus
in Kyushu Univ.(S.Fukada, M.Nishikawa)

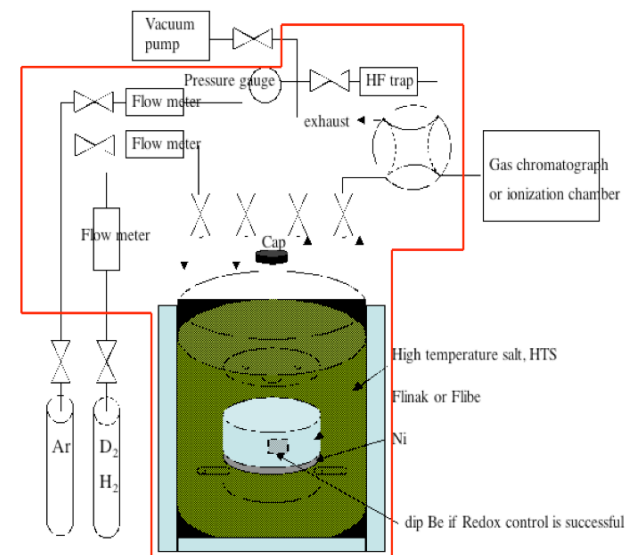
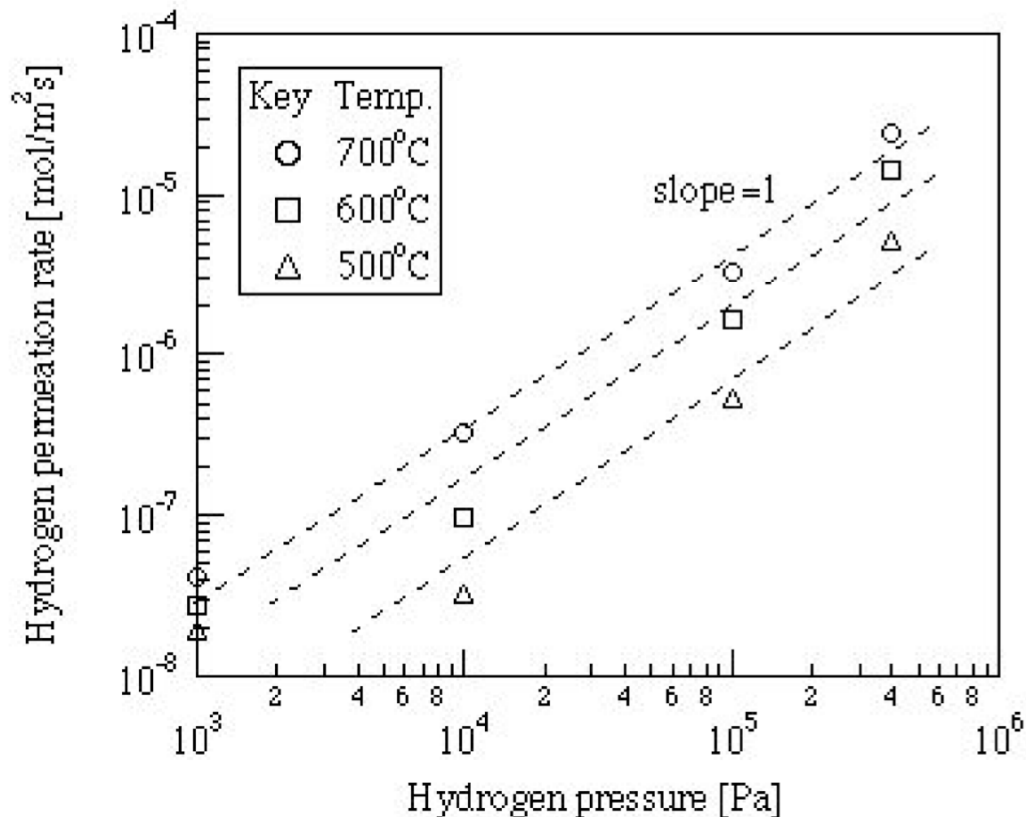


Fig. 1 Assemble of Flinak(Flibe)/H₂ (T₂) permeation pot system

4. 材料腐食に関する実験研究

4.1 JUPITER-II成果(九大 深田、富山大 波多野、他)

<目的>

- Flibe中に溶解したHFとBeの反応を調べること

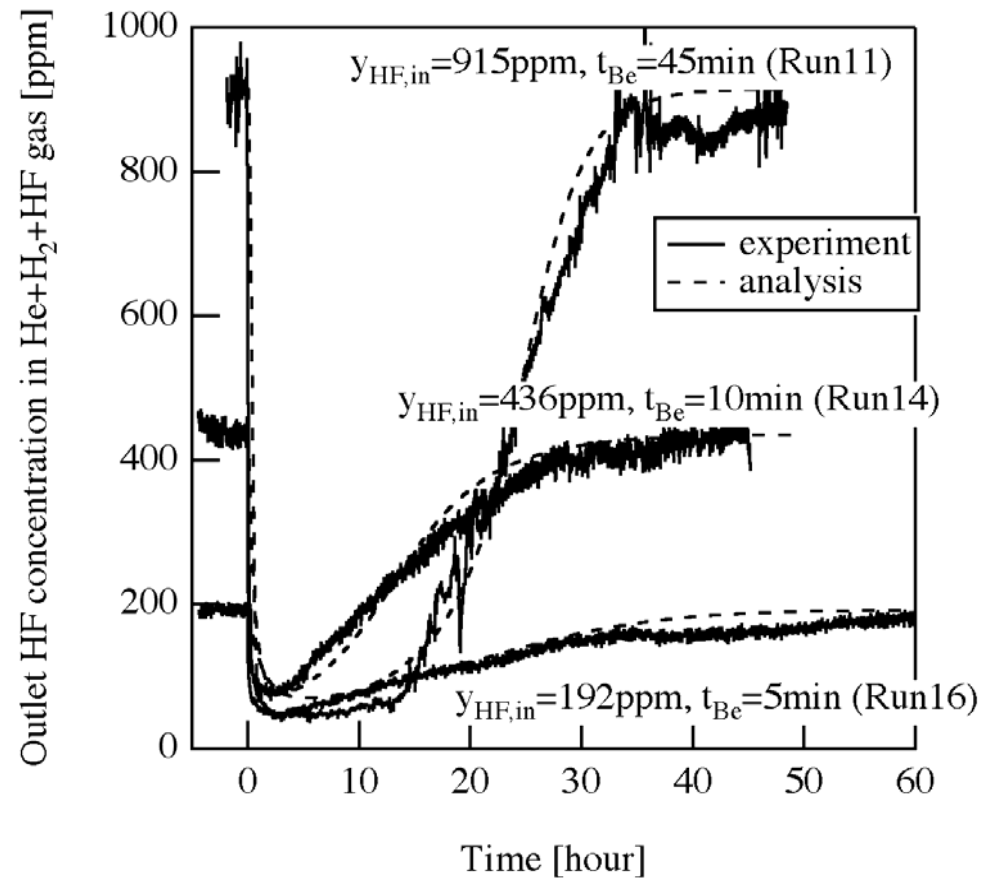
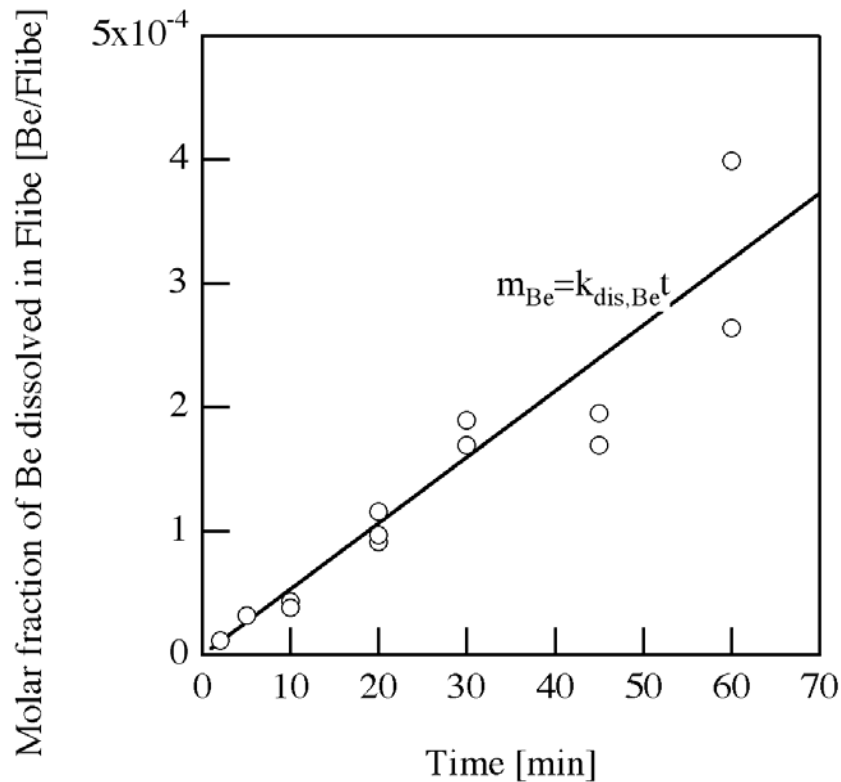
<分かったこと>

- BeはFlibe中によく溶解する
- 溶解率は一次で表面での物理溶解プロセスが関与
- FlibeへのBe溶解速度を実験評価
- HFとBeの見かけの反応速度定数を用いた解析と実験が一致

<今後の課題>

- 強制流動状態のFlibeを使った実験が必要
- 中性子照射下トリチウムのFlibe内挙動の実験評価

- 溶解率は一次で表面での物理溶解プロセスが関与
- HFとBeの見かけの反応速度定数を用いた解析と実験が一致



4. 材料腐食に関する実験研究

4.2 国内共同研究(核融合研 長坂、田中、東大 鈴木、寺井、東海大 近藤、他)

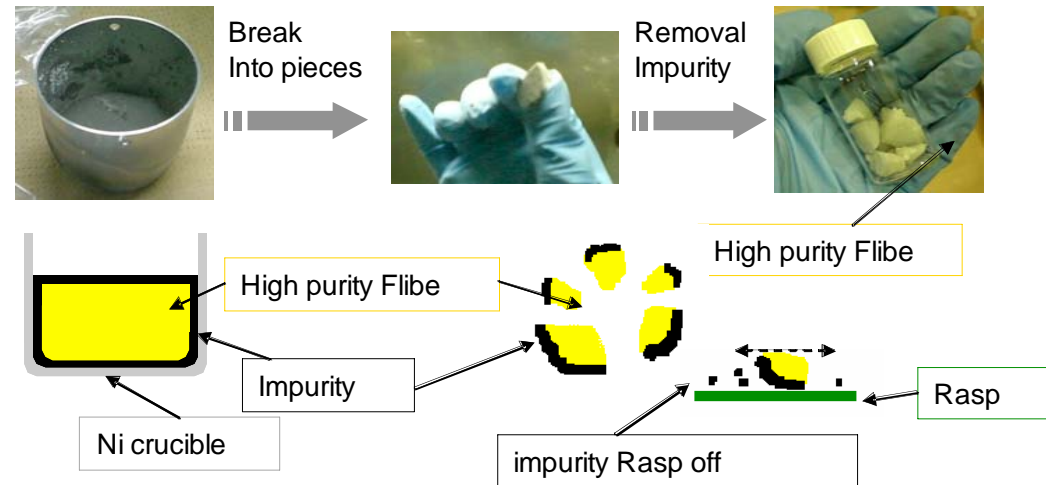
腐食の課題

- (1)高純度Flibeの精製、
- (2)精製したFlibeを用いた静止場腐食試験、
- (3)小型流動ループを用いた自然対流場での腐食試験

(1) 腐食試験用Flibeの精製

<手順>

- (1) LiFとBeF₂を混合し溶融
- (2) HFガスとH₂ガスを用いて溶存している金属酸化物を還元
- (1) 冷却時に析出させて除去

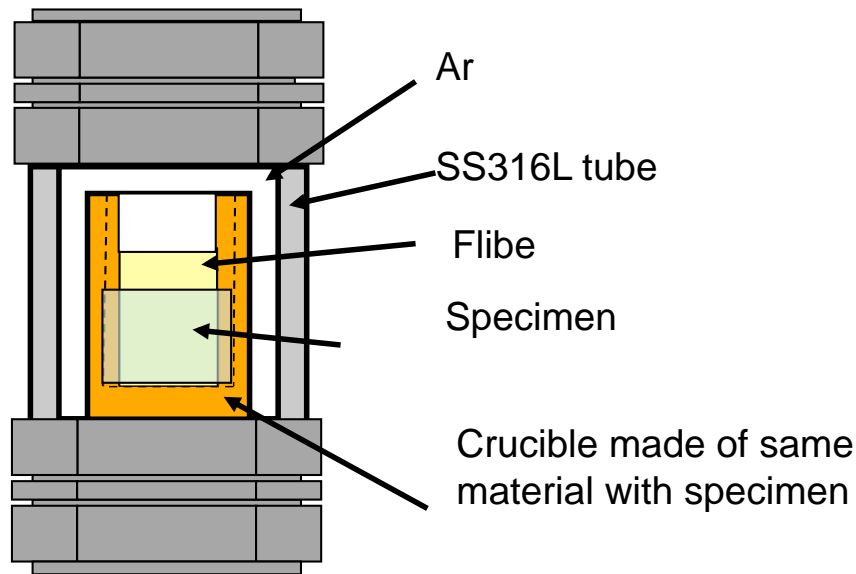


Position	Fe	Cr	W	Ni	Cu	Na	Mg	Al	K	Ca
LiF	14	2	<1	1	1	160	68	15	66	220
BeF ₂	25	7	<1	7	2	1800	210	12	4200	190
2/3 LiF+1/3BeF ₂	18	4	<1	3	1	710	120	14	1400	210
Purified Flibe	4	13	<1	<1	<1	780	160	31	1900	200

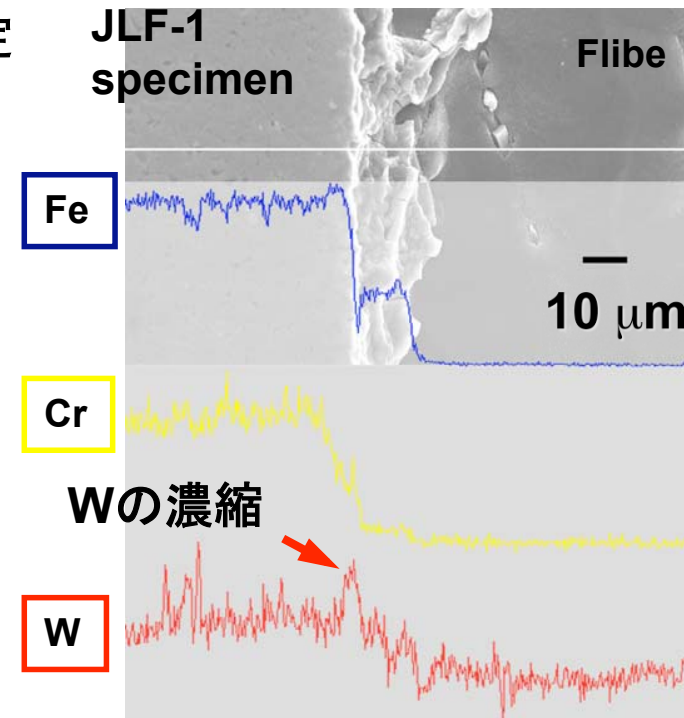
(2) 高純度Flibeを用いた鋼材の共存性試験

長時間の静止場カプセルによる
低放射化フェライト鋼JLF-1(9Cr-2W)の腐食試験の実施

- 試験温度はFFHRの高温部運転温度の550°C
- 浸漬時間は2003時間
- LiCl-KClで洗浄後に表面・断面分析、重量測定



SEM / EDX

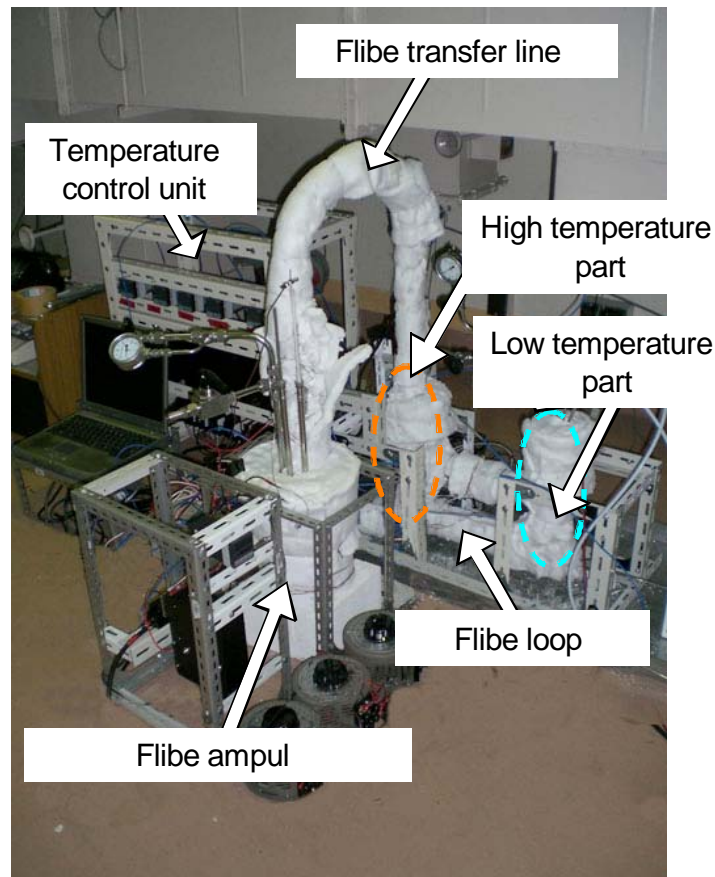


- 表面Feの減少
- 腐食深さは約1.7μm (十分に小さい)
- Fに安定なWが表面に濃縮

(3) 自然対流ループを用いた腐食試験

- 試験片は、JLF-1, SS316L, SS304 (ループ材質はSS316L)
- 200ccのFlibeを使用。
- 高温部600°C、低温部500°C 運転時間は250時間

今後ループを分解し、ループ中に設置した試験片と
ループ配管の腐食分析を実施する計画



自然対流ループを解体するための簡
易型グローブバッグの開発



謹呈 相良様 加藤

JAERI-M
84-090

熔融塩磁場化学効果 (II)

(磁場中の熔融塩流における電位分布
および分極特性)

1984年6月

加藤 義夫・古川 和男^{*}・大野 英雄
勝田 博司・恒川 絃吉^{**}

Orosh²i-1



まとめ

- 熔融塩Flibeブランケットの炉内外循環の特長によって、より高い安全性と高い経済性を目指して、多様な要素研究、設計研究が大学等で進展しているが、
- 当面の課題は、
動特性までカバーする基礎学術領域での要素研究であり、
そのためには用途別小型強制流動ループ
等の共同利用設備の充実が必須である。
- 今後の進め方として、
実験炉モジュールから原型炉を視野に入れた
共同プロジェクト体制の充実と、
システム統合の設計研究体制の充実、が必要である。

啼かぬなら

〇〇〇〇〇〇

ホトトギス