

平成22年5月24日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19206100
 研究課題名（和文） 低放射化材料・液体金属増殖材間の動的物質移行と材料健全性
 研究課題名（英文） Dynamic mass transfer between low activation materials and liquid metal breeders, and materials soundness

研究代表者
 室賀 健夫（MUROGA TAKEO）
 核融合科学研究所・炉工学研究センター・教授
 研究者番号：60174322

研究成果の概要（和文）：核融合炉ブランケット候補液体金属増殖材である液体リチウムとリチウム鉛合金および低放射化候補構造材である低放射化フェライト鋼(JLF-1)とバナジウム合金、酸化物分散強化鋼（ODS 鋼）間の腐食特性と材料の特性変化を明らかにした。特に、静止場と流動場の差、不純物窒素、酸素、炭素の影響を求めると共に、周辺材料との物質移行過程を明らかにし、液体金属ブランケットの物質移行制御への指針を得た。

研究成果の概要（英文）：Compatibility between candidate liquid metal breeders of liquid Li and Li-Pb and candidate low activation structural materials of Reduced Activation Ferritic Steel (JLF-1) and vanadium alloys, and materials property change were investigated for fusion blanket application. In particular, difference between static and flowing conditions, effects of impurity N, O and C and mass transfer to the surrounding materials were clarified, providing suggestion on the mass transfer control of the blanket systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	13,000,000	3,900,000	16,900,000
2008年度	10,700,000	3,210,000	13,910,000
2009年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
年度			
年度			
総計	32,300,000	9,690,000	41,990,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：低放射化フェライト鋼、バナジウム合金、液体リチウム、リチウム鉛、核融合炉ブランケット、腐食共存性、物質移行、不純物効果

1. 研究開始当初の背景

(1) 核融合炉ブランケットは幾つかの概念が検討されているが、液体金属増殖材を用いた概念は特に有望と考えられている。しかし現在の候補構造材料との制御された耐食性の知見、特に材料内部の変化と物質移行過程を明らかにする研究は限られていた。

(2) 研究者らのグループにより、バナジウム合金や低放射化フェライト鋼(JLF-1)、酸化物分散強化鋼(ODS 鋼)の製作技術開発に基づく候補材の標準化、表面分析技術と表面材料特性評価法高度化と関連した知見の蓄積が進み、共通候補材を用いた制御された環境での腐食試験を行う環境が整った。

2. 研究の目的

低放射化フェライト鋼、バナジウム合金、ODS 鋼の高温液体リチウム、リチウム鉛環境下での腐食特性を求め、周辺材料も含めた物質移行過程を明らかにし、液体ブランケットの物質移行制御への指針を得る。

3. 研究の方法

低放射化材料試験片を液体金属増殖材に静的環境下、自然対流流動下、強制流動下で高温浸漬する装置を設計製作し、試験後表面形状、組成、微小領域硬度を求め、増殖材の組成分析を併用し、材料-増殖材間の物質移行過程と流動効果を明らかにする。液体リチウムに関しては、さらにC, N, O 不純物を添加し不純物効果を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 静止場における低放射化フェライト鋼の液体リチウム腐食特性

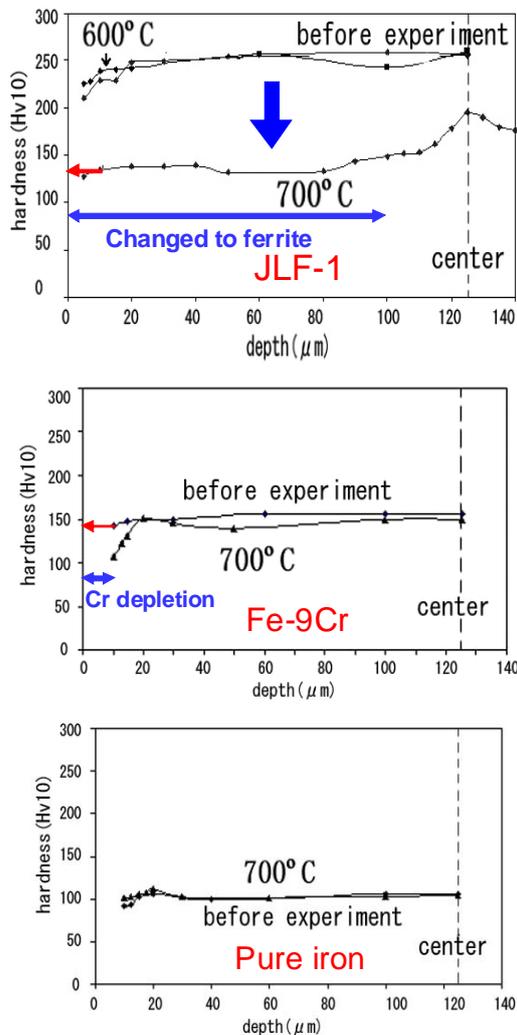


図1 低放射化フェライト鋼 JLF-1、Fe-9Cr 二元合金、純鉄の 600、700°C、100 時間浸漬後のピッカース硬さの深さ分布

わずかに自然対流のみが生じるポット形浸漬試験装置を設計製作し、700°Cまでの温度範囲で最大 750 時間までのリチウム浸漬試験を行った。純鉄、Fe-Cr 二元合金、低放射化フェライト鋼の腐食を比較し、純鉄が最も腐食が少ないことが明らかになった。また、低放射化フェライト鋼の腐食は 600°C以上で急増すること、接液表面近傍において、炭素が溶出することにより、マルテンサイト相がフェライト相に変化し、局所的に軟化することなどが分かった。炭素溶出による相変化はこれまで報告されておらず、新しい腐食機構として重要な発見である。また、表面近傍ではクロムとタングステンの濃度も減少し、組成が純鉄に近づくことが明らかになった。純鉄が耐食性に優れていた結果と合わせると、この組成変化は低放射化フェライト鋼の腐食の飽和機構を示唆するものである。ダイナミック超微小硬度計を用い、表面ごく近傍の局所硬度を測定した。その結果、断面組織観察や断面硬度測定では相変化やそれに伴う軟化が観測されない条件でも、表面ごく近傍は同様に軟化していることが明らかになった。図1は低放射化フェライト鋼 JLF-1、Fe-9Cr 二元合金、純鉄の 600、700°C、100 時間浸漬後のピッカース硬さの深さ分布を示すもので、JLF-1 では 700°Cの浸漬でマルテンサイト相の炭素溶出によるフェライト相への変化に伴う広範囲の軟化が、Fe-9Cr 合金では Cr の欠乏による表面近傍の軟化が起こるが、純鉄では殆ど変化が無いこと事を示す。

(2) 自然対流ループにおける低放射化フェライト鋼の液体リチウム腐食特性

循環流動ループ型の試験装置を設計、製作し、500°Cにおいて浸漬試験と循環流動試験による腐食を比較したところ、図2に示すように

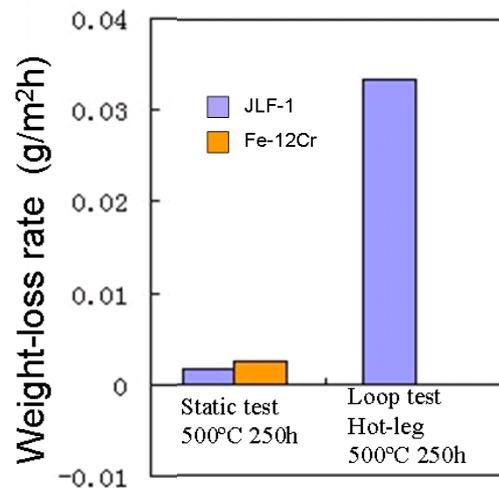


図2 JLF-1 と Fe-12Cr の 500°C、250 時間の静止場浸漬および自然対流ループ浸漬試験から得られた腐食速度の比較

循環流動の場合のほうが腐食量が約 10 倍大

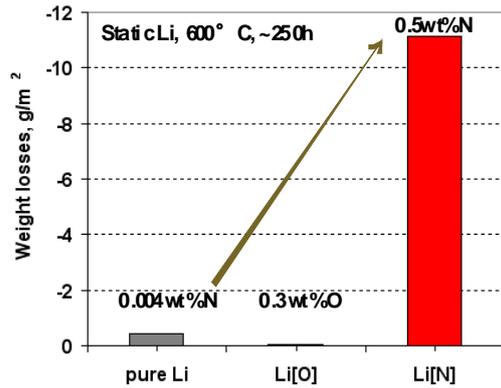


図 3 600°C、250 時間液体リチウム浸漬による JLF-1 の腐食に及ぼす酸素、窒素添加効果

きいことが分かった。ほぼ同条件で浸漬試験と循環流動試験を比べた研究はこれまでほとんどなく、流動効果を示す貴重な成果である。

(3) 窒素不純物効果

ポット形浸漬試験装置を発展させ、窒化リチウムを添加し、不純物窒素濃度を变化させたリチウム中で 700°C までの温度範囲で 250 時間の浸漬試験を行った。その結果、窒素濃度が高いと、低放射化マルテンサイト鋼のラス境界や粒界から選択的に激しい腐食が進み、表面が激しく凹凸を生じるようになることがわかった。また、リチウムに酸素、炭素をそれぞれ加えた浸漬試験と比較し、窒素添加が他の不純物添加に比べ腐食を大きく促進

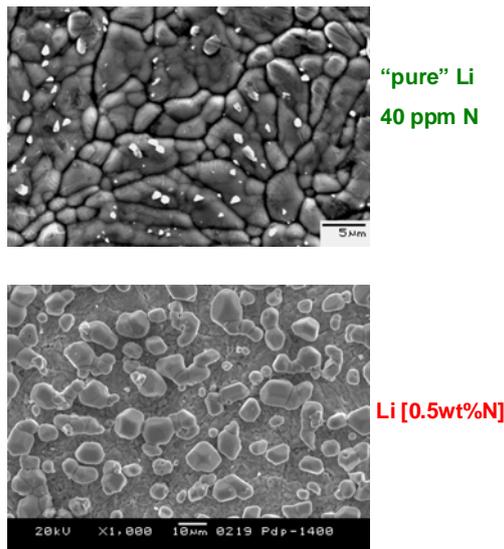


図 4 600°C250 時間静止場リチウム浸漬後の JLF-1 表面形状へ及ぼす窒素添加効果 (下図が窒素添加試験)

することが明らかになった。図 3 は、酸素、

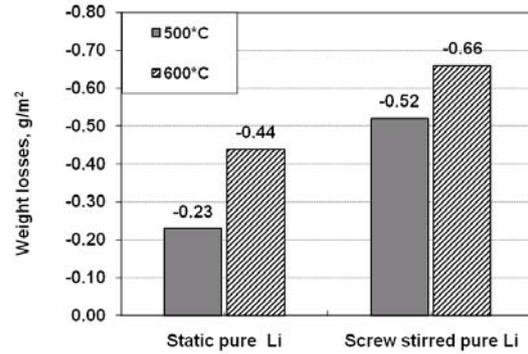


図 5 250 時間浸漬による JLF-1 の腐食量に関する静止場試験と強制流動試験の比較

窒素添加による腐食量を示すもので、酸素添加で腐食は抑制され、窒素添加で大きく促進されることが分かる。また、図 4 は 600°C250 時間静止場リチウム浸漬後の JLF-1 表面形状へ及ぼす窒素添加効果を示すもので、窒素添加なしでは、フェライト相形成による粒成長が見られるが、窒素添加により表面が凹凸をなすよう腐食が進む様子が分かる。

(4) 強制流動環境下での腐食特性

次に、流速を変えることができる、強制対流試験装置を設計製作した。本装置は小型プロペラを用いインベントリーを小さくした。微小球を加えた水試験と熱流動解析計算により、流速分布の評価が可能になった。清浄かつ一定速度の環境でリチウム浸漬試験を行うことが可能であることを確認した。液体リチウム静的浸漬下と強制流動下の腐食特性の違いを比較した。その結果、強制流動下では、低放射化フェライト鋼のラス境界の侵食に伴う小粒子単位での剥離と見られる表面の凹凸が観察され、流動によるエロージョン効果が明確に示された。図 5 は、250 時間浸漬による JLF-1 の腐食量に関する静止場試験と強制流動試験を比較したもので、強制流動試験では腐食の増加が認められる。しかし、図 2 の自然対流ループ試験結果に比べると差は小さい。これは、本強制対流試験が、温度一定条件で行われていることによるものと考えられる。すなわち、腐食に対しては、流動速度よりも流動下の温度差の効果が大きいことが分かる。

(5) V 合金、ODS 鋼のリチウム腐食

長期的な高温低放射化材料として期待される、バナジウム合金 (V-4Cr-4Ti)、9Cr 酸化物分散強化フェライト鋼 (ODS フェライト鋼) について静止場リチウム浸漬試験を行い、バナジウム合金は腐食損失が少なく、熱時効果に伴う強度変化のみが観察された。一方、ODS 鋼では、低放射化フェライト鋼より激

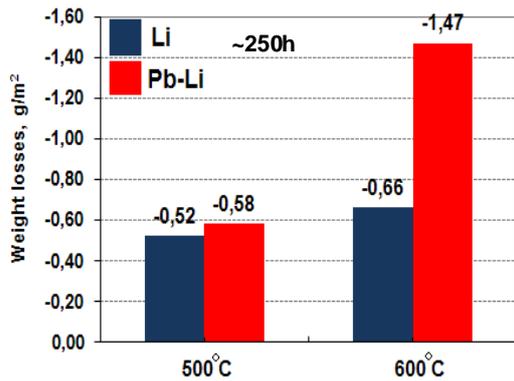


図6 250時間静止場試験によるJLF-1の液体リチウムとリチウム鉛による腐食量の比較

しい腐食が観察された。ODS鋼は高密度の酸化物粒子を分散強化したもので、酸化物粒子のリチウム中の安定性が低いことが原因と考えられる。

(6) リチウム鉛腐食特性

低放射化フェライト鋼のリチウム鉛静止場浸漬腐食試験を行った。リチウム鉛は液体リチウムより一般に腐食は大きい、表面の凹凸形成も激しく、粒界腐食がより進行しやすいことが示唆された。図6は250時間静止場試験によるJLF-1の液体リチウムとリチウム鉛による腐食量を比較したもので、500°Cでは大差ないが、600°Cではリチウム鉛のほうが腐食が増大することが分かる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

① Q. Xu, M. Kondo, T. Nagasaka, T. Muroga and O. Yeliseyeva, Effects of chemical potential of carbon on phase transformation and corrosion of JLF-1 steel in a static lithium, Journal of Nuclear Materials 394 (2009) 20-25. 査読有

② T. Muroga, T. Tanaka, M. Kondo, T. Nagasaka, Q. Xu, Characterization of liquid lithium blanket with RAFM and V-alloys, Fusion Science and Technology (2009) vol. 56, 897-901. 査読有

③ Qi Xu, M. Kondo, T. Nagasaka, T. Muroga, M. Nagura, A. Suzuki, Corrosion characteristics of low activation ferritic steel, JLF-1, in liquid lithium in static and thermal convection conditions, Fusion Engineering and Design, Volume 83, (2008), 1477-1483. 査読有

④ Q. Xu, T. Nagasaka and T. Muroga, Compatibility of low Activation ferritic steels with liquid lithium, Fusion Science

and Technology, 52 (2007) 609-612. 査読有

[学会発表] (計13件)

① M. Kondo, V. Tsisar, T. Muroga, T. Nagasaka, O. Yeliseyeva, Corrosion of RAFM JLF-1 steel in Li flow induced by impeller, presented at Asia Plasma and Fusion Association in 2009, Oct 27-29, Aomori

② 周興華、高橋実、近藤正聡、室賀健夫、液体LiPb中におけるJLF-1の腐食特性に関する研究、日本原子力学会秋の大会、2009年9月16日-18日、仙台

③ V. Tsisar, M. Kondo, T. Muroga, T. Nagasaka, Nitrogen Effect on the Corrosion Behavior of RAFM JLF-1 Steel in Lithium, presented at 14th International Conference on Fusion Reactor Materials, Sep. 6-10 2009, Sapporo

④ M. Kondo, T. Muroga, Qi Xu, T. Nagasaka, T. Oshima, Corrosion and Mass Transfer of RAFM Steel in Li Thermal Convection Loop, presented at 14th International Conference on Fusion Reactor Materials, Sep. 6-10 2009, Sapporo

⑤ T. Muroga, T. Nagasaka, M. Kondo, A. Sagara, N. Noda, A. Suzuki, T. Terai "Compatibility of Reduced Activation Ferritic/Martensitic Steels with Liquid Breeders" 22nd IAEA Fusion Energy Conference 13 - 18 Oct. 2008, Geneva, Switzerland

6. 研究組織

(1) 研究代表者

室賀 健夫 (MUROGA TAKEO)
核融合科学研究所・炉工学研究センター・教授
研究者番号: 60174322

(2) 研究分担者

長坂 琢也 (NAGASAKA TAKUYA)
核融合科学研究所・炉工学研究センター・准教授
研究者番号: 40311203

田中 照也 (TANAKA TERUYA)
核融合科学研究所・炉工学研究センター・助教
研究者番号: 30353444

近藤 正聡 (KONDO MASATOSHI)
核融合科学研究所・炉工学研究センター・助教
研究者番号: 70435519

菱沼 良光 (HISHINUMA YOSHIMITSU)
核融合科学研究所・炉工学研究センター・助教
研究者番号: 00322529