

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04737

研究課題名(和文) 電池材料再資源化と鉄鋼脱リン効率化に向けた熱力学～リン酸の安定性は制御可能か？

研究課題名(英文) Thermochemical studies of phosphates for recycling battery material and removing phosphorus from molten iron

研究代表者

長谷川 将克 (Hasegawa, Masakatsu)

京都大学・エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号：40335203

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：リンは鉄鋼の不純物として除去される一方、肥料や電池材料として再資源化が期待される。リン酸の分離と安定化の制御を目的に「電池材料リサイクルに向けたリン酸の分離」「LiFeP04リサイクルに係る熱力学データベースの構築」「精錬スラグ中のリン酸の安定化」「リン酸を含有する酸化物相の溶体モデルの構築」に取り組んだ。LiFeP04からFeを還元分離し86%のLiを回収できた。リサイクル反応生成物の水への溶解度やP205活量を測定した。Ca2SiO4-Ca3P208固溶体については、Ca2+のFe2+置換によりP205活量は低下したが、モデル計算によりそれがCa3P208活量低下に起因することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄鋼精錬スラグは塩基性酸化物-酸性酸化物-FeO系であるが、リチウムイオン電池正極材料LiFeP04も塩基性酸化物Li2O-酸性酸化物P205-FeO系と言える。LiFeP04リサイクルから鉄鋼精錬までの幅広い温度域におけるリン酸塩の活量測定法を確立でき、リン酸塩に関する測定値や文献値の精度を考察した。本研究課題ではLiFeP04からのLi回収反応と溶鉄からの脱リン反応に関わるデータの測定・解析を行った。今後、自動車や再生可能エネルギー向けの蓄電池の需要が増加し、水素還元鉄では不純物除去での負荷が増大すると予想される。カーボンニュートラル社会実現に向け、本研究成果を活用しさらに発展させたい。

研究成果の概要(英文)：Although phosphorus is one of impurities in liquid steel, phosphorus is expected to be recovered as a raw material for fertilizer and battery. Both of dephosphorization slag in steelmaking process and LiFeP04, which is one of the cathode materials in Lithium-ion batteries, are considered to be basic oxide-P205-FeO systems. Based on this consideration, this study has been aimed at determining chemical properties of phosphate in basic oxide-P205-FeO systems. In this study, the P205 activities in these systems could be measured in the wide temperature range. When FeO in LiFeP04 was reduced and removed as metallic iron, 86% of Li could be recovered. In dephosphorization slags, the P205 activity decreased drastically when Ca2+ in Ca2SiO4-Ca3P205 solid solutions was replaced with Fe2+. In order to realize carbon neutrality, I would like to continue to investigate the chemical properties of phosphate using the present results.

研究分野：化学熱力学

キーワード：リン酸 電池材料 再資源化 鉄鋼プロセス

1. 研究開始当初の背景

研究代表者はこれまで溶鉄からの脱リン用精錬スラグにおいて、固相と液相の共存関係や成分活量を測定し、精錬スラグの発生量低減に向けた低塩基度化の限界について評価した(科学研究費:基盤研究(C)平成27~29年度)。脱リン生成物である P_2O_5 は化合物 Ca_2SiO_4 中に溶解して $Ca_2SiO_4-Ca_3P_2O_8$ 固溶体を生成するが、固溶体が $CaSiO_3$ と共存する低塩基度スラグを用いても工業的要請レベルまで溶鉄中のリンを除去できる可能性を示した。 $Ca_2SiO_4-Ca_3P_2O_8$ 固溶体はスラグの精錬能を支配する固相であり、この固溶体の熱力学的性質を示す溶体モデルを構築した。

また、精錬スラグでは液相生成による反応速度向上が議論されてきたが、脱硫反応と高合金鋼の溶製に関して積極的な固相の活用を検討した(科学研究費:基盤研究(C)平成30~令和2年度)。 $CaO-Al_2O_3$ 系包接化合物は液相スラグと比較しても硫黄吸収能が高く、微粉化により低温でも脱硫反応が進行することを示した。高合金鋼溶製スラグである $CaO-SiO_2-Cr_2O_3$ 系の Cr_2O_3 活量を測定し、状態図を平衡計算によって作成することに成功した。

以上のように研究代表者は鉄鋼精錬スラグとして使用される酸化物について固相の役割に注目し、活量測定と溶体モデルにより熱力学的性質を明らかにしてきた。精錬スラグは一般に塩基性酸化物-酸性酸化物- FeO 系であることに着目すると、リチウムイオン電池正極材料 $LiFePO_4$ も同様の塩基性酸化物 Li_2O -酸性酸化物 P_2O_5 - FeO 系と言える。本研究課題では使用済み電池材料のリサイクルを目標に、リン酸(P_2O_5)の安定性制御について検討した。

2. 研究の目的

本研究課題では素材生産・リサイクルに関連する高温乾式プロセスのうち、リン酸の分離/安定性の制御による電池材料 $LiFePO_4$ の再資源化と鉄鋼脱リンの効率化について、プロセス設計・解析の基礎となる研究を行った。以下に4テーマの目的を示す。

(1) 電池材料リサイクルに向けたリン酸の分離

リチウムイオン電池正極材料には $LiCoO_2$ や $LiFePO_4$ などが使用されるが、レアメタル(Co や Ni)を含むものは使用済み電池から酸を用いた湿式処理によってリサイクル(レアメタル回収)が行われている。一方、本研究課題で注目した $LiFePO_4$ は使用する元素が Fe や P と安価であるという特徴が逆にリサイクルを阻んでおり、酸処理よりも低コストのプロセスが求められる。本研究課題では一定温度で酸素分圧を制御した反応管内において $LiFePO_4$ と添加物との混合物を焼成し、その後水に溶解して Li を回収した。水での Li 回収率の最適条件を明らかにした。

(2) $LiFePO_4$ リサイクルに係る熱力学データベースの構築

Li 回収の最適条件を検討するための熱力学データが揃っていないのが現状である。熱力学データを用いれば、起こりえない反応を判断することや、効率の良い反応経路を考案できる。テーマ(1)の Li 回収反応に関わる熱力学データ(生成物の P_2O_5 活量や水への溶解度)を測定した。

(3) 精錬スラグ中のリン酸の安定化

溶鉄からの脱リンに用いられる精錬スラグの基本系は $CaO-SiO_2-P_2O_5-FeO$ 系であり、脱リン生成物である P_2O_5 は $Ca_2SiO_4-Ca_3P_2O_8$ 固溶体中に取り込まれる。活量は P_2O_5 の安定性を表す指標であるが、 $CaO-SiO_2-P_2O_5-FeO$ 系液相や $Ca_2SiO_4-Ca_3P_2O_8$ 固溶体への添加物が P_2O_5 活量に及ぼす影響は明らかになっていない。本研究課題では酸化物中の P_2O_5 の安定性を理解することを目的に P_2O_5 活量と添加物濃度の関係を明らかにした。また、 P_2O_5 活量や化合物 $Ca_3P_2O_8$ の生成Gibbsエネルギー変化について測定値と文献値の精度についても考察した。

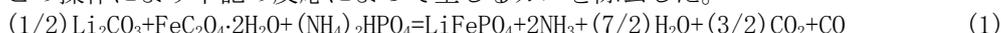
(4) リン酸を含有する酸化物相の溶体モデルの構築

リン酸 P_2O_5 の安定性を明らかにするにはテーマ(3)の実験値が不可欠であるが、実験だけで全ての検討条件を網羅することは現実的ではない。実験値を高精度で再現できる溶体モデルを用いれば、反応シミュレーションに活用できるとともに、精錬工程の省資源化・省エネルギー化に向けた新しい温度/組成を提案できる。過去にも報告された溶体モデルがあるが、本研究課題では酸化物のネットワーク構造を考慮した新しいモデル構築にチャレンジした。

3. 研究の方法

(1) 電池材料リサイクルに向けたリン酸の分離

実験に用いた $LiFePO_4$ の作成方法を示す。出発材料である Li_2CO_3 、 $FeC_2O_4 \cdot 2H_2O$ 、 $(NH_4)_2HPO_4$ を混合し、ペレット状に成形した。水分と残存酸素を除去したアルゴンガスを流通させた電気抵抗炉(図1(a))内で、白金プレート上に載せたペレット(図1(b))を623Kにおいて2時間保持した。この操作により下記の反応によって生じるガスを除去した。



試料を再度ペレット成形し、1073Kにおいて12時間保持して $LiFePO_4$ を得た。

$LiFePO_4$ 、 C (グラファイトまたはカーボンブラック)、試薬 K_2CO_3 、試薬 Li_2CO_3 を混合し、ペレット状に成形した。成形した試料を白金プレートに載せ、水分と残存酸素を除去したアルゴンガスを流通させた電気抵抗炉(図1(a))内で1133Kまで昇温し、20時間または40時間保持した。得られた試料に蒸留水を加え、マグネティックスターラーを用いて1時間攪拌した。静置後の溶液

に生じた沈殿はメンブレンフィルターを用いた真空ろ過により除去した。ろ過後の溶液中のLi濃度を高周波誘導結合プラズマ発光分光分析法(ICP)により測定し、Li回収率を求めた。

(2) LiFePO_4 リサイクルに係る熱力学データベースの構築

① リン酸塩の水への溶解度

Li_2CO_3 、 K_2CO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ を様々な割合で混合し、ペレット状に成形した。試料を大気雰囲気下で 623K に昇温し、2 時間保持した。その後試料を粉砕・再ペレット成形し、大気雰囲気下 723K に約 12 時間保持した。

得られた試料は粉末 X 線回折に供し、化合物の同定を行った。得られた試料に蒸留水を加え、マグネティックスターラーを用いて 1 時間攪拌した。溶液中に生じた沈殿は真空ろ過により除去し、溶液中の Li、K、P 濃度を ICP により分析して溶解度を求めた。

② $\text{Li}_2\text{O}-\text{P}_2\text{O}_5$ 系の P_2O_5 活量の測定

活量の測定対象である $\text{Li}_3\text{PO}_4+\text{Li}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 混合物を用いてるつぼを作成し、その中に Ag-Cu-P 合金を挿入した(図 1(c))。Ar+H₂+H₂O 混合ガスを流通させて酸素分圧を制御した電気抵抗炉(図 1(a))内で試料を 1073K で保持し、平衡させた。Ag-Cu-P 合金中の P 濃度を ICP により分析したが、Cu と P のスペクトルが干渉することを避けるため、モリブドリン酸を用いた溶媒抽出により Cu と P の分離を行った。

(3) 精錬スラグ中のリン酸の安定化

出発材料である CaCO_3 、 SiO_2 を混合し、ペレット状に成形した。試料を大気雰囲気下 1573K に昇温し、 Ca_2SiO_4 及び CaSiO_3 を作成した。また Fe、 Fe_3O_4 、 SiO_2 の混合物ペレットを Ar 雰囲気 1373K で加熱し、 Fe_2SiO_4 を合成した。 Ca_2SiO_4 、 Fe_2SiO_4 、 $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$ 、 CaSiO_3 混合物でるつぼを作成し、Cu-Fe-P 合金を挿入した(図 1(c))。図 2 より実験温度 1573K において、るつぼは $\text{Ca}_2\text{SiO}_4-\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$ 固溶体 + CaSiO_3 二相共存となり、 Ca^{2+} の一部は Fe^{2+} で置換される。

Ar+H₂+H₂O 混合ガスを流通させて酸素分圧を制御した電気抵抗炉(図 1(a))内で試料を 1573K で保持し、平衡させた。Cu-Fe-P 合金試料はモリブドリン酸を用いた溶媒抽出により Cu と P の分離を行った後、Fe 濃度と P 濃度を ICP により分析した。

(4) リン酸を含有する酸化物相の溶体モデルの構築

溶融スラグに対してはシリケートネットワーク構造を考慮したモデルを構築した。また、一部の Ca^{2+} が Fe^{2+} で置換した $\text{Ca}_2\text{SiO}_4-\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$ 固溶体に対しては、 $(\text{SiO}_4)^{4-}$ と $(\text{PO}_4)^{3-}$ のアニオン同士、 Ca^{2+} と Fe^{2+} のカチオン同士が置換し合うと考え、準正則溶体モデルを適用した。

4. 研究成果

(1) 電池材料リサイクルに向けたリン酸の分離

主な試料の Li 回収率を図 3 に示す。多価イオンを含むリン酸塩は水へ難溶であることが知られているが、 LiFePO_4 をそのまま水に溶解した場合の Li 回収率は 0.6% にとどまり(試料 1)、溶解度が極めて小さいことが確認された。 LiFePO_4 に還元剤としてのグラファイトと P_2O_5 安定化剤としての Li_2CO_3 あるいは K_2CO_3 を添加し、1133K で 20 時間加熱した場合(試料 2 及び試料 3)、Li 回収率はそれぞれ 68.7%、61.0% に向上した。生成物は $(\text{Li}, \text{K})_3\text{PO}_4$ と考えられる。また LiFePO_4 中

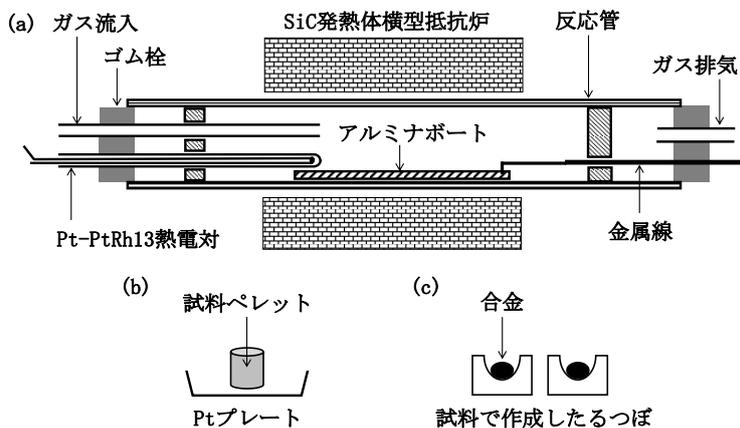


図 1 実験装置

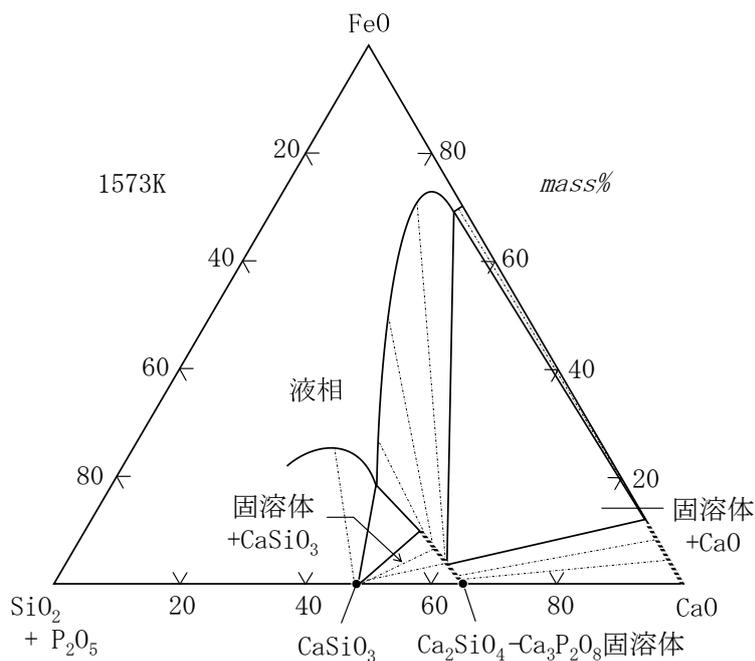


図 2 $\text{CaO}-(\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5)-\text{FeO}$ 擬三元系の 1573K における相平衡

に生じた沈殿はメンブレンフィルターを用いた真空ろ過により除去した。ろ過後の溶液中のLi濃度を高周波誘導結合プラズマ発光分光分析法(ICP)により測定し、Li回収率を求めた。

の Fe0 は還元され、金属 Fe が生成したことが確認された。さらなる Li 回収率向上を目的に LiFePO₄+グラファイト+K₂CO₃ 混合物の加熱時間を 40 時間に延長したところ (試料 4)、回収率は 86.3% となった。一方、加熱時間短縮を目的に還元剤としてカーボンブラックを用いた場合、20 時間加熱でも Li 回収率は 78.9% となった。試料 3 と試料 5 の比較により、グラファイトに比べてカーボンブラックの反応性が高いことが分かった。

(2) LiFePO₄ リサイクルに係る熱力学

データベースの構築

①リン酸塩の水への溶解度

図 4 に溶解度とリン酸塩中の K/Li 比の関係を示す。塩基性酸化物 (Li₂O、K₂O) と P₂O₅ のモル比が 3 : 1 の化合物では、リン酸塩中の Li が K に置換されると溶解度が大幅に大きくなることが分かった。一方、塩基性酸化物 (Li₂O、K₂O) と P₂O₅ のモル比が 2 : 1 の化合物では溶解度はほとんど変化しなかったが、Li-rich 側では 3 : 1 の化合物に比べて 2 : 1 の化合物の溶解度の方が大きい

ことが明らかになった。本研究課題におけるリン酸塩の作成ではガスが発生するため単相のみを得ることは難しく、図 4 に示した溶解度は相の存在割合を考慮して求めたものである。高精度で溶解度を測定するためにはリン酸塩の再合成も検討すべきではあるが、本研究成果よりテーマ (1) のリサイクル反応において Li₄P₂O₇ を生成する経路も有効であることが示唆された。引き続き実験を実施していきたい。

②Li₂O-P₂O₅ 系の P₂O₅ 活量の測定

本実験での平衡反応は下記で表される。



$$K(2) = a_{P_2O_5} / (\gamma_P^2 \cdot X_P^2 \cdot P_{O_2}^{5/2}) \quad (3)$$



$$K(4) = 1/a_{P_2O_5} \quad (5)$$

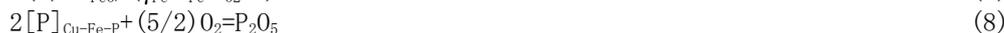
K は反応の平衡定数、 γ_P と X_P は Ag-Cu-P 合金中の P の活量係数とモル分率、 P_{O_2} は酸素分圧である。Li₃PO₄+Li₄P₂O₇ 二相共存での P₂O₅ 活量 $a_{P_2O_5}$ は式 (5) で規定されるが、実験では制御した P₂O₅ においてリン酸塩と平衡する Ag-Cu-P 合金中の P のモル分率 X_P を求め、式 (3) に代入することで値が得られる。1073K において Li₃PO₄+Li₄P₂O₇ 二相共存での P₂O₅ 活量 $a_{P_2O_5}$ は 8.9×10^{-15} と求められ、酸性酸化物である P₂O₅ は塩基性酸化物 Li₂O と化合することにより活量が大きく低下して安定化することが示された。また熱力学データ集より Ca₃P₂O₈+Ca₂P₂O₇ 二相共存での P₂O₅ 活量 $a_{P_2O_5}$ は 1073K において 1.1×10^{-12} と計算されるが、CaO に比べて Li₂O の塩基度が高いことから、P₂O₅ 活量値が低くなった本実験結果は妥当であると考えられる。

(3) 精錬スラグ中のリン酸の安定化

本実験での平衡反応は下記で表される。



$$K(6) = a_{FeO} / (\gamma_{Fe} \cdot X_{Fe} \cdot P_{O_2}^{1/2}) \quad (7)$$



$$K(8) = a_{P_2O_5} / (\gamma_P^2 \cdot X_P^2 \cdot P_{O_2}^{5/2}) \quad (9)$$

K は反応の平衡定数、 γ_{Fe} と X_{Fe} は Cu-Fe-P 合金中の Fe の活量係数とモル分率、 γ_P と X_P は Cu-Fe-P 合金中の P の活量係数とモル分率、 P_{O_2} は酸素分圧である。CaSiO₃ と共存する Ca₂SiO₄-Ca₃P₂O₈ 固溶体中の FeO 活量 a_{FeO} と P₂O₅ 活量 $a_{P_2O_5}$ は、制御した P₂O₅ において固溶体と平衡する Cu-Fe-P 合金中の Fe と P の濃度 (X_{Fe} 、 X_P) を求め、式 (7) 及び式 (9) に代入することで値が得られる。

CaSiO₃ と共存する Ca₂SiO₄-Ca₃P₂O₈ 固溶体中の FeO 活量と固溶体中の Fe²⁺/Ca²⁺置換率の関係を図 5 に示す。Fe²⁺/Ca²⁺置換率が増加するほど FeO 活量は高くなり、その傾向は Ca₂SiO₄-Ca₃P₂O₈ 固溶体+CaSiO₃+液相の三相共存域における文献値^[1]と矛盾しなかった。ここで固溶体中の Ca²⁺の一部が Fe²⁺で置換されたとき、成分として Fe₂SiO₄ を考えることができる。



$$K(10) = a_{Fe_2SiO_4} / (a_{FeO}^2 \cdot a_{SiO_2}) \quad (11)$$

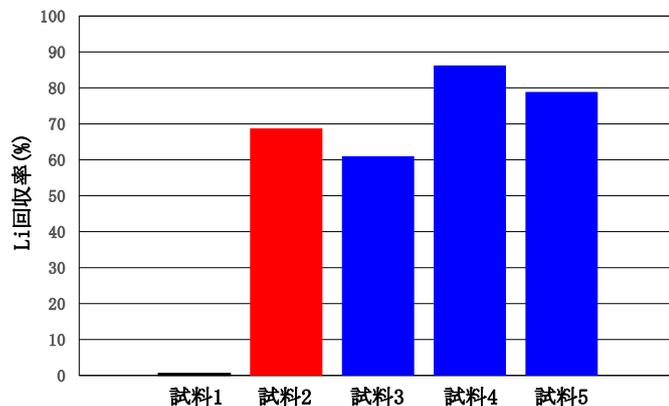


図 3 リチウム回収率

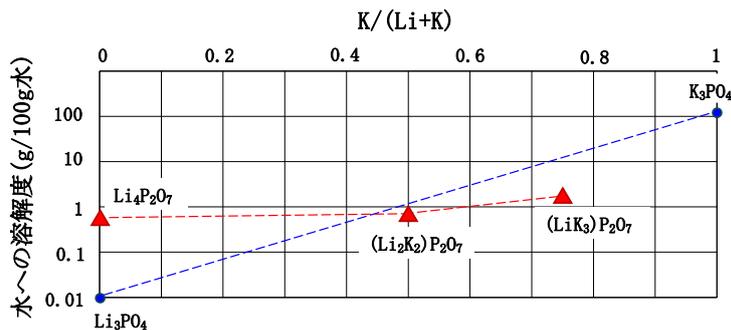


図 4 リン酸塩の水への溶解度と K/Li 比の関係

固溶体の組成が同一であっても、 CaSiO_3 と共存するとき SiO_2 活量は高く、 CaO と共存するとき SiO_2 活量は低くなる。式(11)より Fe_2SiO_4 活量が同じであっても SiO_2 活量が低いほど FeO 活量は高くなると言えるが、これは図 5 に示した CaO 共存時の文献値^[2]が Fe^{2+} 置換により急激に FeO 活量が上昇したことを説明している。すなわち、図 2 において固溶体は CaSiO_3 と共存するとき低 FeO 濃度 (活量) の液相と平衡し、 CaO と共存するとき高 FeO 濃度 (活量) の液相と平衡するという相平衡関係が熱力学的に妥当なものであることが示された。

$\text{Ca}_2\text{SiO}_4\text{-Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$ 固溶体中の P_2O_5 活量に及ぼす $\text{Fe}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 置換の影響を図 6(a) に示す。 Ca^{2+} がわずかに Fe^{2+} と置換されても P_2O_5 活量は急激に低下することが分かった。また固溶体に Gibbs-Duhem 式を適用することにより活量の測定値から他の成分の活量を算出した結果を図 6(b) に示す。 $\text{Fe}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 置換により Ca_2SiO_4 活量はほとんど変化しないが、 $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$ 活量は低下する結果となった。したがって、図 6(a) での P_2O_5 活量の低下は $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$ 活量の低下に起因することが明らかとなった。

本研究課題での解析を通じて、リン酸塩中の P_2O_5 活量及び化合物の生成 Gibbs エネルギー変化の測定値及び文献値のばらつきの原因は、式(9)中の Cu-Fe-P 合金中の P の活量係数にあると判断した。リン酸塩に関する熱力学データはカーボンニュートラル社会実現に向けた水素製鉄においても重要であり、今後は測定の不確かさを極力排除する工夫をしながら研究を進展させていきたい。

(4) リン酸を含有する酸化物相の溶体モデルの構築

熔融スラグに対してシリケートネットワーク構造を考慮したモデルを構築した。比較的簡単な式によって測定値を再現することができた。 $\text{Ca}_2\text{SiO}_4\text{-Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$ 固溶体に対して $(\text{SiO}_4)^{4-}$ と $(\text{PO}_4)^{3-}$ のアニオン同士、 Ca^{2+} と Fe^{2+} のカチオン同士が置換するモデルを構築し、実験値及び相平衡関係を説明した。また、研究代表者が過去に取り組んだ科学研究費 24510098 (基盤研究(C)) において得られていた測定データにも同様の考え方を応用して再解析を行い、その成果も論文投稿した^[3]。

<引用文献>

- [1] R. Matsugi, K. Miwa and M. Hasegawa; *ISIJ Int.*, vol. 57(2017), No. 10, pp. 1718-1724.
- [2] K. Miwa, R. Matsugi and M. Hasegawa; *ISIJ Int.*, vol. 57(2017), No. 10, pp. 1725-1732.
- [3] K. Saito, S. Nagata, Y. Kashiwaya and M. Hasegawa; *ISIJ Int.*, vol. 63(2023), No. 7, pp. 1178-1184.

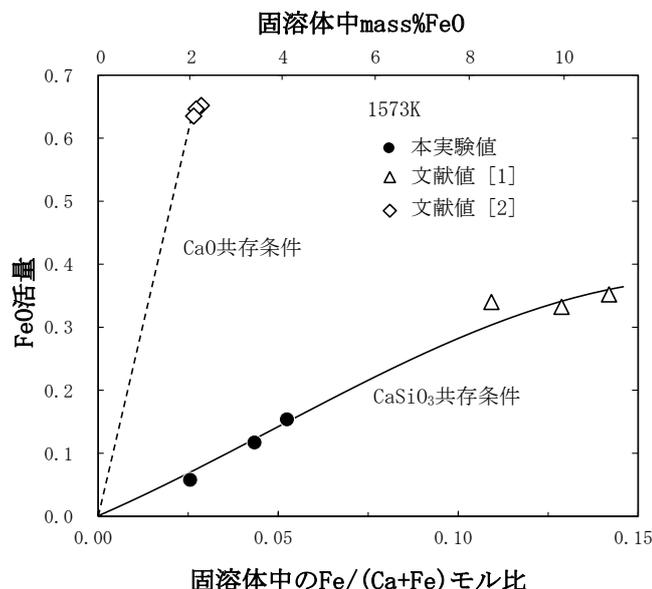


図 5 $\text{Ca}_2\text{SiO}_4\text{-Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$ 固溶体中の FeO 活量と $\text{Fe}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 置換率の関係

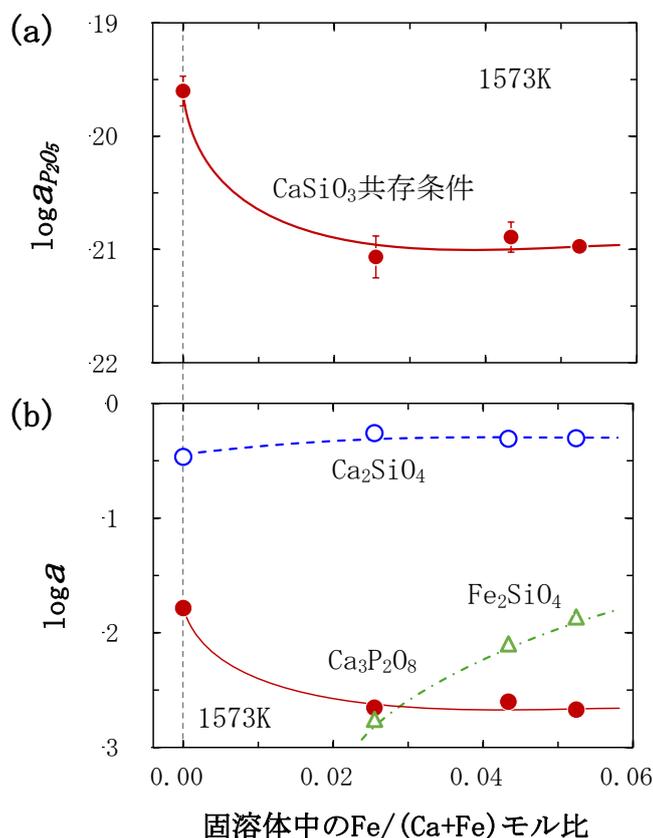


図 6 $\text{Ca}_2\text{SiO}_4\text{-Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$ 固溶体中の成分活量と $\text{Fe}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 置換率の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Saito Keijiro, Kashiwaya Yoshiaki, Hasegawa Masakatsu	4. 巻 63
2. 論文標題 Solubility and Activity of Iron Oxide in Solid Solutions between Ca ₂ SiO ₄ and Ca ₃ P ₂ O ₈ at 1573 K	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 631 ~ 638
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-514	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Naoya Matsushita, Kosuke Awaya, Keijiro Saito, Masakatsu Hasegawa	4. 巻 61
2. 論文標題 Thermochemical Properties of Copper-Iron-Sulfur Alloy as Reference Metallic Phase for Analyzing Resulfurization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 2929-2936
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-247	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Saito Keijiro, Yoshiyuki Makino, Masakatsu Hasegawa	4. 巻 64
2. 論文標題 Effect of Iron Oxide Dissolution on Thermochemical Property of Solid Solution between Ca ₂ SiO ₄ and Ca ₃ P ₂ O ₈ at 1 573 K	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 935-943
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-466	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 齋藤啓次郎, 長谷川将克, 柏谷悦章
2. 発表標題 (Ca,Fe) ₂ SiO ₄ -(Ca,Fe) ₃ P ₂ O ₈ 固溶体中のFeO活量の測定
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第184回秋季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤啓次郎, 長谷川将克, 柏谷悦章, 玉田圭太郎, 平田健太郎
2. 発表標題 耐火物成分MgOを含むスラグ中の1573KにおけるFexO活量
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第184回秋季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤啓次郎, 長谷川将克
2. 発表標題 SiO2含有スラグに対する新たな溶体モデルの構築
3. 学会等名 資源素材学会 関西支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川将克
2. 発表標題 固液共存不均一スラグに関する熱化学的研究
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第183回春季講演大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤啓次郎, 柏谷悦章, 長谷川将克
2. 発表標題 FexO-SiO2スラグ中のFexO活量に及ぼすMgO添加の影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第183回春季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤啓次郎, 長谷川将克, 柏谷悦章, 川西咲子
2. 発表標題 Ca ₂ SiO ₄ -Ca ₃ P ₂ O ₈ 固溶体中の成分活量に及ぼすFeOの影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第186回秋季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋藤啓次郎, 長谷川将克
2. 発表標題 リン酸カルシウムCa ₃ P ₂ O ₈ のGibbsエネルギー測定を再評価
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第187回春季講演大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Keijiro Saito, Masakatsu Hasegawa
2. 発表標題 Activities of components in Ca ₂ SiO ₄ -Ca ₃ P ₂ O ₈ solid solution at 1573 K
3. 学会等名 MOLTEN2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 平塚美有, 齋藤啓次郎, 長谷川将克, 柏谷悦章
2. 発表標題 電池材料の再資源化と脱リンの高効率化に向けたリン酸塩の熱力学
3. 学会等名 日本鉄鋼協会・日本金属学会 関西支部 学生ポスター発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都大学プロセス熱化学研究室ホームページ
<http://www.lupin.mtl.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------