



多元系熱力学的平衡計算による アーク炉鑄鋼大気溶製シミュレーションモデルの開発

(株)宇部スチール

技術部 技術開発係 係長

宮本 諭卓

品質保証部

奥村 佳代

製鋼営業部

村上 雄大

宇部興産(株)

研究開発本部

泉 達郎

1. 緒言

アーク炉は様々な側面から改良が加えられ日々進歩しており、大容量化・省エネルギー化された現在では数百トンもの溶解が可能な設備も珍しくない。今日、大型設備であるアーク炉の改造や製鋼プロセスの改良をするにあたっては、炉内の現象をモデル化して最適な方法をシミュレーションすることが必須となっており、電気工学・熱工学・金属工学などの分野で研究開発が行われている。^{1~4)}しかし、炉内は様々な物理現象が相互影響しながら非定常・非平衡に変化していく複雑系の問題であり、現状のコンピュータ能力ではすべての現象を考慮して現実的な時間内で計算結果を出すことは不可能である。そのため一般的には炉内現象のエッセンスを抽出し、それらをモデル化することで限られたリソース内で数値計算を行う手法がとられる。例えば製鋼分野においては、溶鋼およびスラグ反応を熱力学平衡計算で考察する。^{5~8)}熱力学平衡計算を平たく述べると、ある組成がある温度で液体・固体・気体になり得るものを示す方法のことである。多成分系について化学反応の方向性や、組成の濃度・相変化が計算できるため製鋼プロセスの検討に非常に適している。ただし、計算は平衡状態(十分に時間が経過した状態)であり、非平衡状態である実操業を取り扱うには、速度論などのマクロスケールでの考察が必要な場合もある。

一方、鑄造業界では鑄込み以降のプロセス検討にモデル化とシミュレーションが用いられている⁹⁾が、溶製プロセスシミュレーションについての研究や改善事例はあまり見られない。その理由の一つとして、平衡計算結果は計算状態図とし

て表されるが、それが実操業とどれほどの対応を示すのかが現場的に理解し難いという点が挙げられる。確かに鑄造シミュレーションは、凝固・湯流れ・熱応力などの計算結果が三次元CGで表されてどこで何が発生しているのか一目瞭然である。結果の信頼性は別として、素人目にも分かり易く表示する手法は、現場作業者の技術理解ひいては実操業での技術再現性に寄与し、最終的に品質向上へとつながるため、工学の観点で非常に重要な要素であることは間違いない。

そこで本研究では、溶製シミュレーションモデルの開発を目的として大気溶製の現象をモデル化し平衡計算を行い、組成の推移を表示して計算結果の精度を検証した。

2. 実験方法

2-1 操業条件のサンプリング

平衡計算にはインプット条件が必要であるため、操業条件をサンプリングした。大気溶製の操業条件概要を表1および図1に示す。溶解・酸化精錬は60tアーク炉(60000KVA)で行い、続いて取鍋製錬炉(14500KVA)で還元精錬し成分調整後に出鋼して鑄込みを行う。溶解重量は約58,000tで溶製鋼種はJIS G 5102炭素鋼鑄鋼SC450を満足するものである。サンプリングした操業条件は、配合スクラップ組成、溶解期・酸化期に使用した酸素(補助燃焼用・カッティング用・酸素吹精用)、各種造滓材および合金組成、それらを添加したタイミングでの溶鋼温度である。また、計算値との比較値として、溶鋼組成・鋼中ガス成分・スラグ組成を実験値とする。操業条件を時系列で繋ぐことで、大気溶製における

表 1 大気溶製の操業条件概要

作業区分	60T EAF			取鍋	LF	取鍋
	溶解期		酸化期	出鋼	還元期	出鋼
時間	40~60min		20~30min	10min	40~50min	—
操業	初装	追装	溶落	酸化精錬	移動	還元精錬+成分調整
酸素	燃焼・カッティング			脱炭	—	—
造滓材合金	生石灰 加炭材	生石灰 加炭材 助燃剤	—	—	—	—
目的	燃焼・溶解促進		脱炭素・燐 酸末C調整 脱窒素・水素	生石灰 アルミネート Si-Mn, Fe-Si	生石灰, アルミネート, Al 加炭剤, Fe-Si, Fe-Mn Ca-Si	Al
				予備脱酸	脱酸素、脱硫、 成分・温度調整 介在物の形態制御	

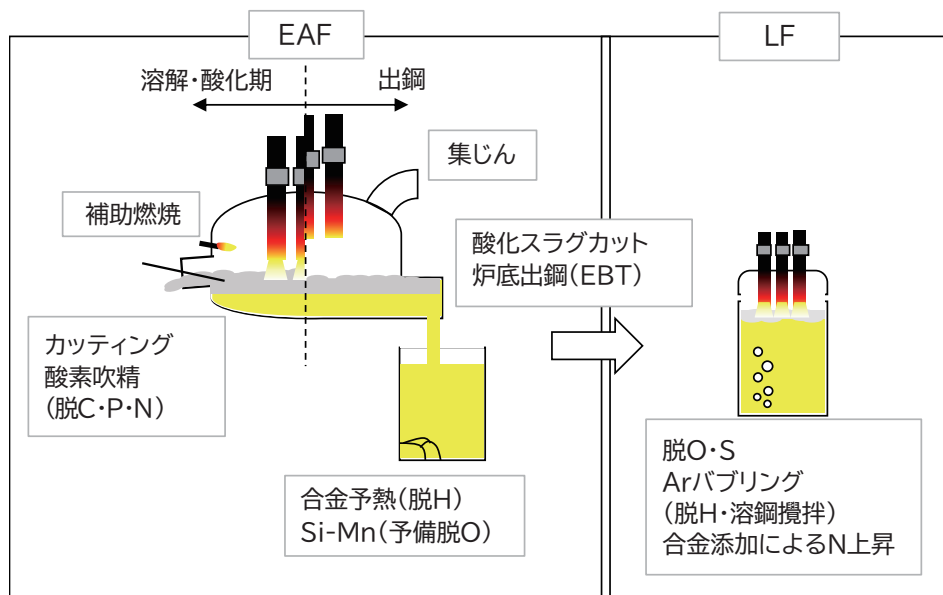


図 1 大気溶製の操業条件概要

溶鋼およびスラグの性状変化と添加剤等の投入タイミングを見えるようにする。得られた実験値は第3項で示す。

2-2 平衡計算によるモデル化

平衡計算にはFactSage7.3 (GTT-Technologies製)を使用する。まず操業時の初期条件(アーク炉：溶け落ち前から開始、溶鋼質量58t、スラグ質量4,000kg、LF：還元期初期から開始、溶鋼質量5t、スラグ質量300kg)にて平衡計算を行い、次の测温および添加材添加の際に、増分のインプット条件を追加して、次々と計算を行うことで疑似的に時間経過を再現させる。平衡計算の範囲は、大気-スラグ-溶鋼とする。また、溶鋼精

錬はスラゲーメタル間の界面反応律速であるため、これについてもモデル化を行う。1ステップの平衡計算における界面反応モデルの適用を図2に示す。まず、溶鋼の一部を界面相と見なして、スラグおよび添加剤と一緒に平衡計算を行い、その後計算した溶鋼界面相と残りの溶鋼および合金を一緒に平衡計算する。これを各ステップで繰り返し行う。本来は物質移動速度、固溶体と液相スラグの反応、COガス・Arガスによる攪拌や物理的脱ガス元素挙動などを追加考慮する方法も考えられるが、複雑かつ微細な現象のモデル化が必要となるため、本研究ではこれらの影響は溶鋼との界面反応度合で表現できると仮定して、界面相の溶鋼割合を種々変化させて計算する。

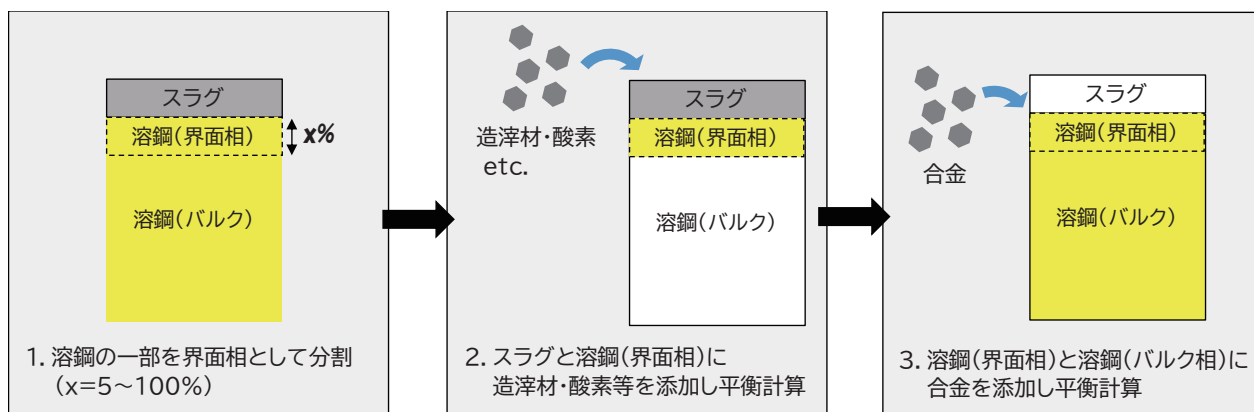


図2 界面反応のモデル化

3. 実験結果

3-1 実操業の結果(実験値)

大気溶製における溶鋼およびスラグの性状変化を図3に、還元期での添加剤等投入時期を表2に示す。酸化期には脱炭・脱磷・脱窒素が徐々に進行した。また[Mn]も徐々に減少した。脱珪は溶解落ち時にすでに完了していた。逆に酸素とスラグ中の(FeO)と(MnO)は増加した。硫黄については増減の変化が見られなかった。

還元期には脱酸が一気に進行した後に、脱硫が徐々に進行し、合金添加により溶鋼組成が調整された。窒素は合金中に含有しており還元が進むにつれ上昇した。スラグ組成については、酸化期では酸素吹精により(FeO)の割合が増加し、還元期には酸化スラグがカットされ還元スラグの割合が増加した。

3-2 実験値と計算値の比較

(1)酸化期

酸化期における溶鋼およびスラグ組成の実験値および計算値を図4に示す。[Si]、[S]の推移は界面相の考慮有無に係わらず実験値と良い対応が得られている。[C]、[Mn]、[P]の推移は界面相を20%、30%とした場合に実験値と良い対応が得られた。[O]、[N]、[H]は実験値と乖離したが、[O]の推移の傾きは界面相を20%、30%とした場合に概ね対応している。(SiO₂)、(MnO)の推移は界面相の考慮有無に係わらず概ね実験値と対応した。(CaO)、(Al₂O₃)、(FeO)の推移は界面相を30%、50%とした場合に概ね実験値と対応した。

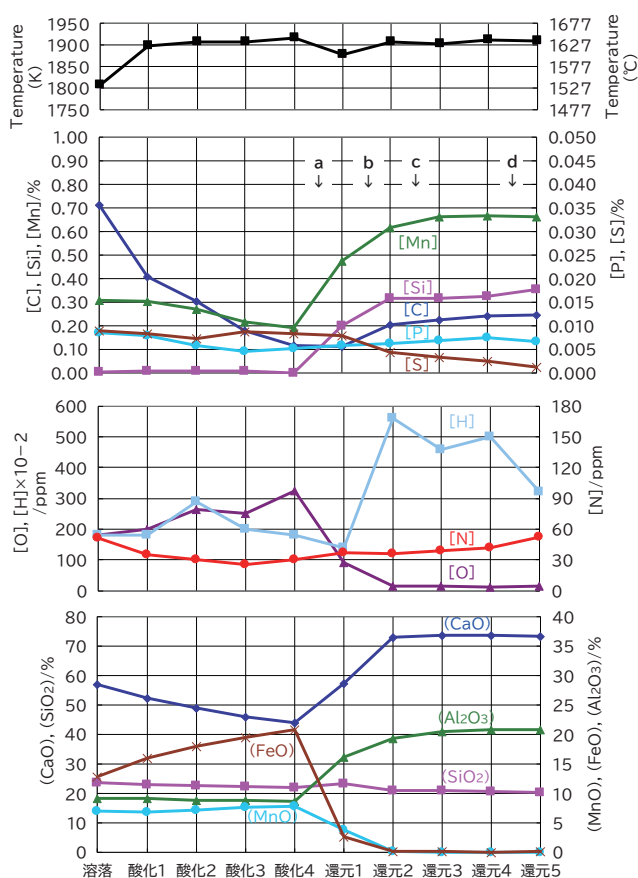
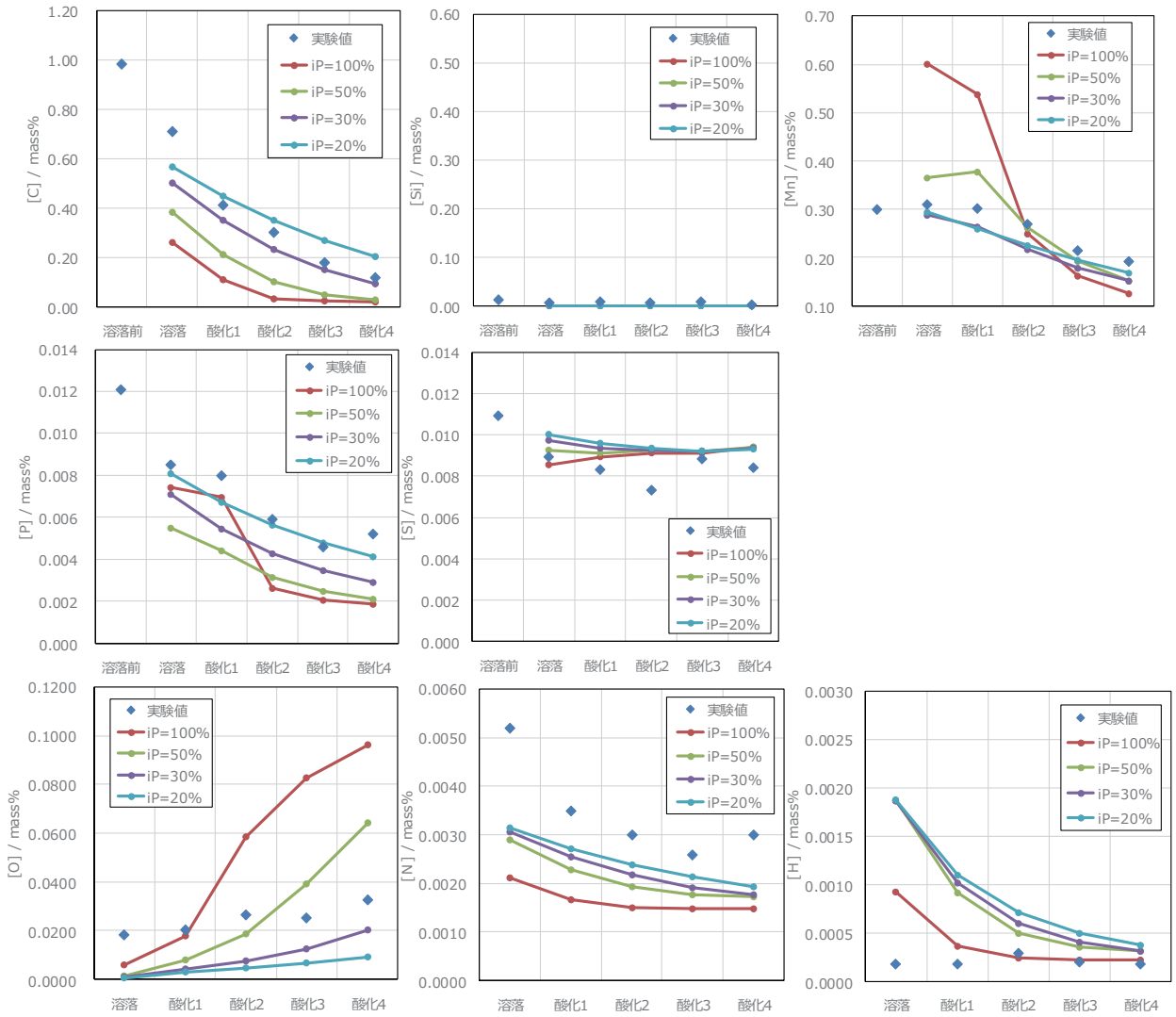


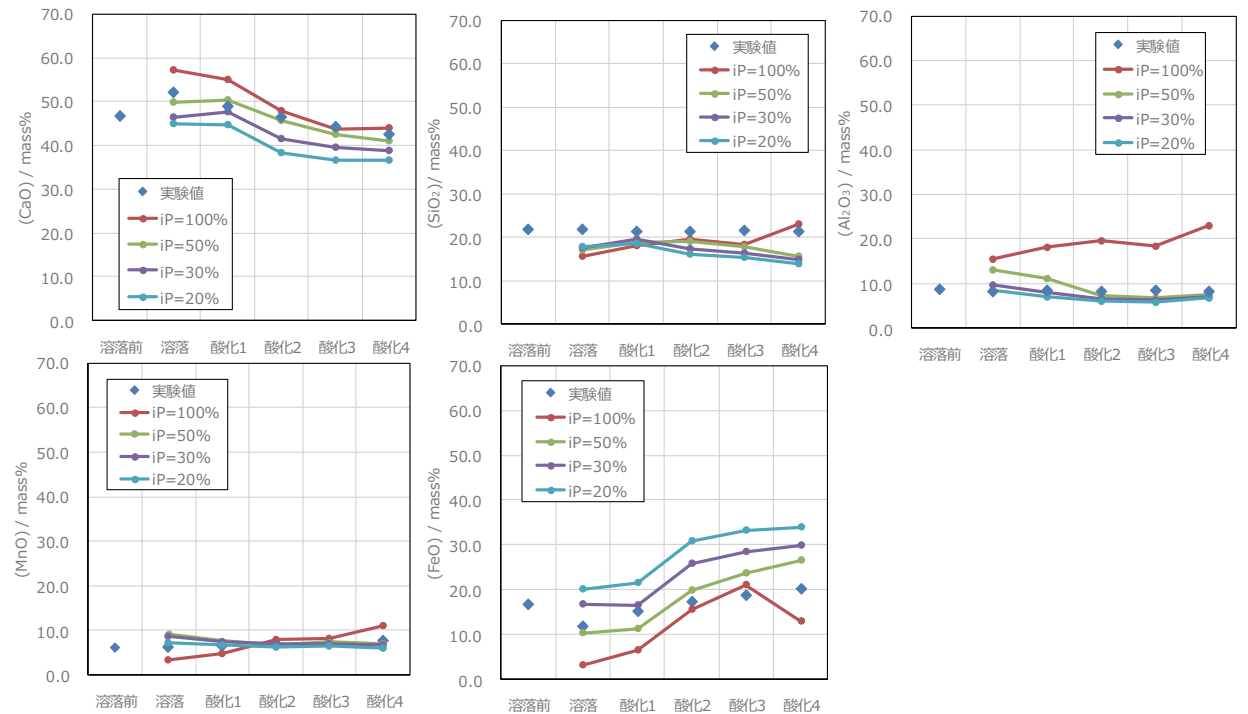
図3 大気溶製における溶鋼およびスラグの性状変化

表2 還元期での投入添加剤と時期

a	b	c	d
CaO	CaO	加炭剤	加炭剤
アルミネート	アルミネート	Fe-Mn	Al
Al	加炭剤		Ca-Si
Si-Mn	Fe-Si		
Fe-Si	Fe-Mn		



a) 溶鋼組成



b) スラグ組成

図4 酸化期における溶鋼およびスラグ組成の実験値および計算値 (iP=溶鋼界面割合)

(2)還元期

還元期における溶鋼およびスラグ組成の実験値および計算値を次頁図5に示す。[C]、[Si]、[Mn]、[P]の推移は界面相の考慮有無に係わらず実験値と良い対応が得られている。[S]の推移は界面相を50%とした場合に実験値と良い対応が得られた。[O]は実験値よりも低い値となった。[N]、[H]は実験値と乖離した。また、推移の傾きも合わなかった。(CaO)の推移は界面相の考慮有無に係わらず実験値よりも高い値となった。(SiO₂)の推移は界面相の考慮有無に係わらず実験値よりも低い値となった。また、界面相を10%、20%とした場合に実験値により近くなった。(Al₂O₃)の推移は界面相を10%、20%とした場合に実験値と良い対応が見られた。(MnO)、(FeO)の推移は界面相の考慮有無に係わらず概ね実験値と対応した。

(3)全体の推移

ガス元素を除いた計算結果から、実験値に近い界面相割合を選択し合わせ込んだ計算値の結果を図6に示す。還元期の(CaO)、(SiO₂)を除いて推移は概ね対応した。

4. 考察

通常の平衡計算に界面反応モデルを考慮した本研究の計算は、アーク炉での大気溶製の予測にはほぼ適用可能であることが明らかになったと考える。また、実操業のサンプリングに際しては、化学組成・鋼中ガス組成・スラグ組成・溶鋼温度および添加剤を時系列で記録し、その全ての推移を確認することで、界面反応が溶製に大き

な影響を与えていることを示したと考えることができる。

実験値で炭素・燐・硫黄が工程の進行とともに溶鋼から減少していく場合、計算値においてもその推移の対応は概ね良好であり、溶鋼界面の割合を精錬の良し悪しと見なすことで、直感的に理解しやすく無理のない計算を行うことができている。各組成の実験値にはまだ誤差があるが、入力条件としての操業詳細や今回の計算に含まれていない、耐火煉瓦の溶損・ホットヒール・合金中の窒素および水素などを考慮することで、精度向上の余地があると考えられる。加えて今回のモデルでは界面相の割合を50%にした場合に実験値とよく一致する結果もあり、単に界面相としてではなく、物理的機構(ガス元素における、酸化期のCOガスのボイリング、還元期のArのような不活性ガスバブリングによる脱ガス、またその溶鋼攪拌力、界面の波立ちによる大気からの窒素吸収や、スラグにおけるフォーミングスラグの考慮や蛍石・アルミネート添加によるスラグ粘性の考慮¹⁰⁻¹³)による界面反応の度合いが影響しているものと考えられる。これについては今後の研究課題であり、合わせこみによって回帰式を構築して界面相割合に取り込むことなどを検討している。しかし、今回の計算値は実験値と概ね一致しており、鋳鋼の大気溶製プロセスを検討するにあたっては問題のないものとする、今回のシミュレーションモデルは従来の検討手法よりも高度化したといえる。

また、溶鋼・スラグの性状変化が網羅的に確認可能であることは、改善検討時のリスク回避にも効果があると考えられる。将来的には溶製シ

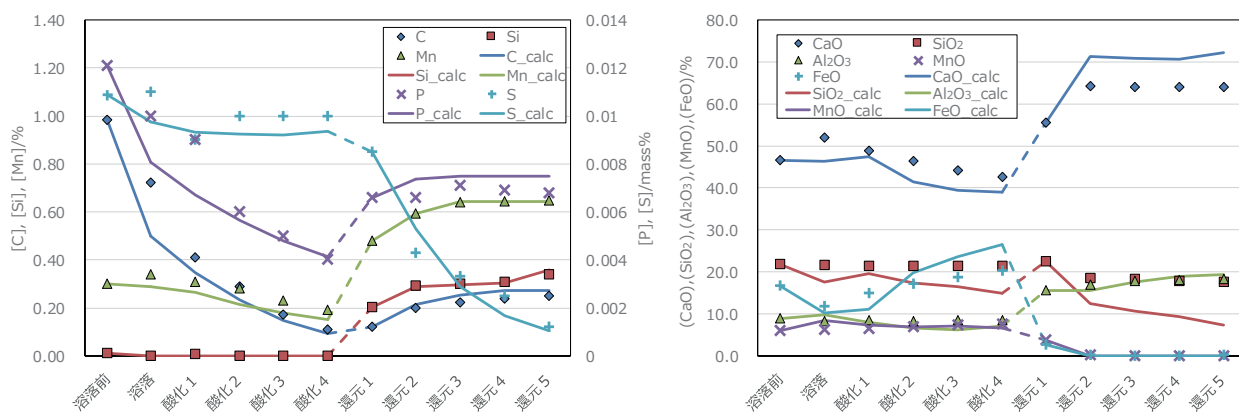
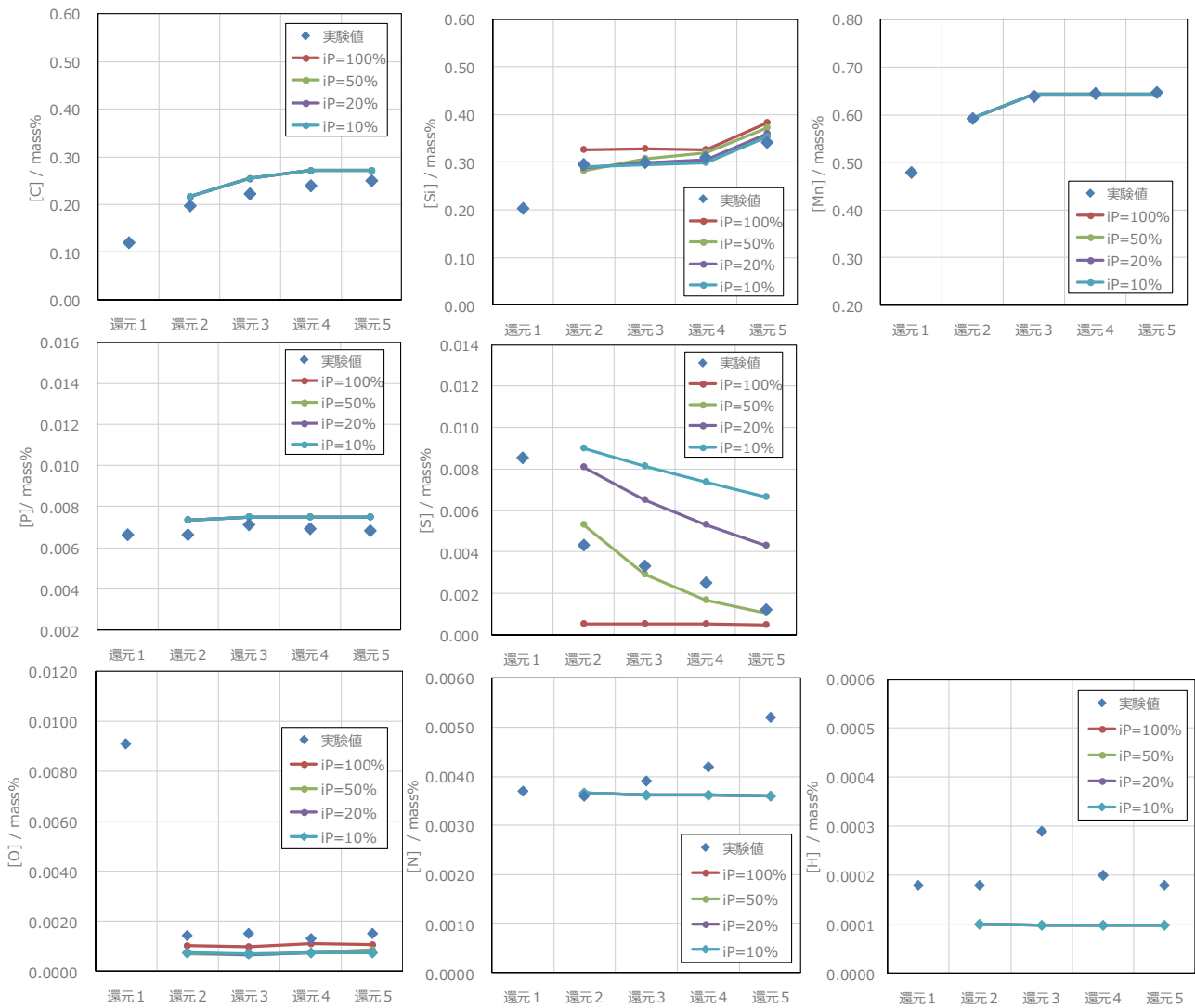
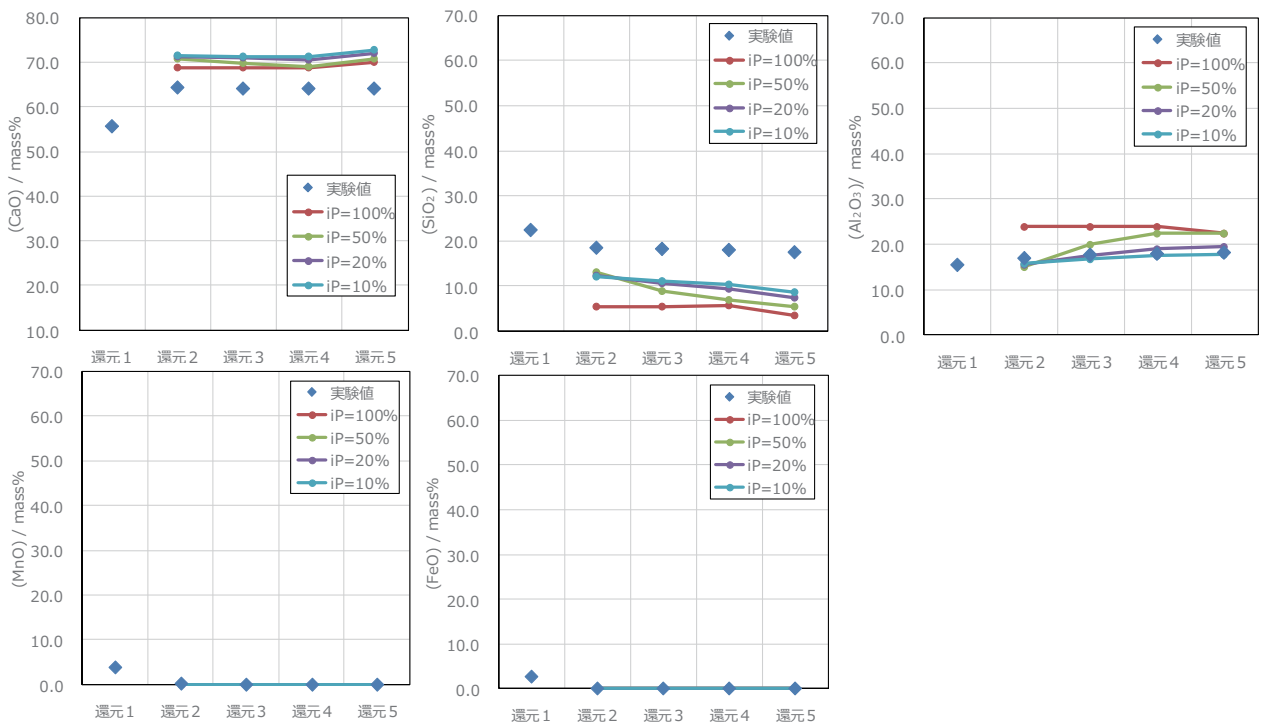


図6 実験値に近い界面相割合を選択し合わせ込んだ溶鋼およびスラグ組成計算値の推移



a) 溶鋼組成



b) スラグ組成

図5 還元期における溶鋼およびスラグ組成の実験値および計算値 (iP=溶鋼界面割合)

ミュレーターとして溶解者の教育にも役立つのではないかと考えられる。現在当社では、このモデルを適用して、CaO、CaF、アルミネート適正使用量の検討や最適なスラグ組成の検討を行っている。

5. 結言

アーク炉での鑄鋼大気溶製時の組成等を多元系熱力学的平衡計算し実測値と比較した結果、次の結論を得た。

- (1) 多元系熱力学的平衡計算を連続的に行うことでアーク炉での大気溶製をシミュレーションする手法を開発した。
- (2) 界面反応律速をモデル化し適用することで、平衡計算のみの場合よりも組成の推移精度が向上した。
- (3) 溶鋼界面相の割合を種々変化させることで推移精度が向上した。
- (4) アーク炉にて大気溶製する実際の操業において有用であることが確認できた。

参考文献

- 1) 北村信也、伊藤公久、Farshid Pahlevani、森正樹：鉄と鋼100(2014)59-67
- 2) 宍田康裕、東秀樹、小山修、横倉邦夫、金子徳男：放電 開閉保護 高電圧 合同研究会 電気学会研究会資料(2015)91-96
- 3) 奥村太佑、中嶋規勝、大脇智、堀秀幸：電気製鋼88(2017)27-32
- 4) 中澤重厚、阿座上竹四、矢澤彬：資源と素材115(1999)781-786
- 5) 佐藤潤：鑄鋼と鍛鋼543(2015)3-10
- 6) 佐々木太郎、大西洋史：鑄鋼と鍛鋼545(2016)3-9
- 7) 飛松晴記：鑄鋼と鍛鋼546(2017)3-11
- 8) 曾根崎宏昌：鑄鋼と鍛鋼549(2018)3-14
- 9) 大中逸雄：まてりあ53(2014)462-466
- 10) 素形材センター編：鑄鋼の生産技術(2014)195
- 11) 森井簾：電気炉製鋼法 日本鉄鋼協会編(2000)71-73
- 12) 素形材センター編：鑄鋼の生産技術(2014)199
- 13) 日本鑄鍛鋼会編：鑄鋼品の製造標準[溶解編]改訂版(1979)41