

連携記事

カーボンフリーに向けた製鋼用スクラップ予熱型アーク炉と大型アーク炉の課題

Challenges of Scrap Preheating Arc Furnaces and Large Arc Furnaces for Steelmaking toward Carbon-free

スチールプランテック(株)
プラントエンジニアリング本部
製鋼エンジニアリング部 部長
佐藤靖浩
Yasuhiro Sato

スチールプランテック(株)
取締役
三上安己
Yasuki Mikami

1 はじめに

地球温暖化防止を目的とする温室効果ガスの削減など環境規制のさらなる強化が予測される中、鉄鋼業界においても大きな方向転換が迫られている。

製鋼用アーク炉においては、排出されるCO₂はそのほとんどが使用する電力と、熱源および加炭材として利用される炭材によるものである。よって、これらをいかに削減するかが課題となるが、ここでは特に電力削減を目的とするスクラップ予熱型アーク炉について、現在展開されている技術について考察を行っていく。

一方、アーク炉製鋼法でのCO₂排出量は、高炉—転炉法によるものに比べ、約1/4であるといわれている。このことから、昨今では高炉—転炉法からアーク炉製鋼に置換する動きが世界中で検討、実行されている。しかし、生産量が多い一貫製鉄所では、大型アーク炉への置換が必要となり、そのためには大容量の電源設備などが必要となる等、様々な考慮すべき課題が発生する。本稿では、生産性と電源設備仕様の関係をシミュレーションし、アーク炉の大型化に伴う様々な問題点についても考察を行っていく。

2 スクラップ予熱型アーク炉

2.1 アーク炉におけるCO₂排出量

図1は製鋼用アーク炉を有する工場におけるCO₂排出量の計算例である。やはり一番大きな割合を占めるのが、スクラップ溶解に用いるアーク炉本体で使用する電力であり、次にその他の電力(LF、補機電力、圧延を含む)となっている。3番目を占めるのがアーク炉に投入する炭材である。これからもわかるように、アーク炉においては電力削減(省エネ)

＝CO₂排出量削減が最も重要なテーマであることは間違いない。以下に、電力削減を目的とした、最近のスクラップ予熱型アーク炉に関する考察を行う。

2.2 アーク炉操業(バッチ装入炉と連続装入炉)

スクラップ予熱型アーク炉に触れる前に、バッチ装入炉(俗称:Top-Charge、略記:Top-C)と連続装入炉(俗称:Flat-Bath、略記:FB)についての違いについて触れる。図2はバッチ装入炉(Top-Charge)の操業方法を示す。スクラップヤードにおいてスクラップバケットにスクラップを装入し、これをアーク炉の直上に運び、炉蓋を開き、スクラップバケットの底を開くことによりスクラップはアーク炉本体へと装入される。溶解初期から溶鋼が炉底に溜まるまで(溶解期)、黒鉛電極は発生したアークの熱によってスクラップを溶解しながら掘り進んでいく。その間スクラップの崩落等によりアーク長(アーク電圧)やアーク電流は瞬時に変化

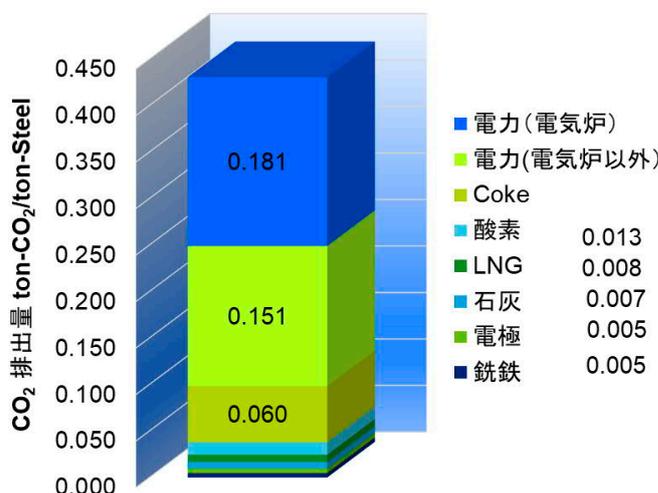


図1 アーク炉におけるCO₂排出量内訳 (Online version in color.)

し、この負荷変動にともない母線電圧が変動し照明器具のちらつきなどフリッカ障害が問題を生じさせることがある。そのため、アーク炉を有する工場では、上流の電源系統に影響を及ぼさないようにフリッカ補償装置 (SVC : Static Var Compensator) を設置している。

これに対し、連続装入炉 (Flat-Bath) はコンベアやスキップボックスなどを用い、アーク炉の側面、あるいはアーク炉に直結したシャフトを通じてスクラップを連続的に装入する。図3は連続装入炉 (Flat-Bath) の炉内模式図である。アークは常に溶鋼との間で発生するため、電流、電圧が安定して変動が少ない。このため、バッチ装入炉に比べ、発生するフリッカ量が大幅に小さくなるという特徴がある。

2.3 スクラップ予熱型アーク炉

図4はバッチ装入炉におけるヒートバランスを示したものである¹⁾。アーク炉への入熱としては、電力、カーボン反応

熱、金属酸化熱、バーナ燃焼熱があり、合計で770 kWh/tonとなっている。出熱としては本プロセスの製品である溶鋼が370 kWh/tonとなっており、その他の出熱はいわゆる“ロス”ということになる。この“ロス”のうち、大半を占めるのが排ガスの熱量であり、ここでは280 kWh/tonとなっているが、この熱を原材料であるスクラップと熱交換させて回収し、入力である電力原単位を削減するというプロセスがスクラップ予熱型アーク炉である。

この排ガス熱量を回収するスクラップ予熱技術として、1980年ころにSPH (Scrap Pre-heater) が誕生し、その後各メーカーが様々なタイプの予熱装置を市場に投入してきた。各タイプとも電力原単位の削減効果、メンテナンス性、環境対策などの向上を競ってきたが、今日では次の3つのタイプが主流となっている。

- 1) 水平コンベア型予熱炉
- 2) フィンガシャフト型予熱炉

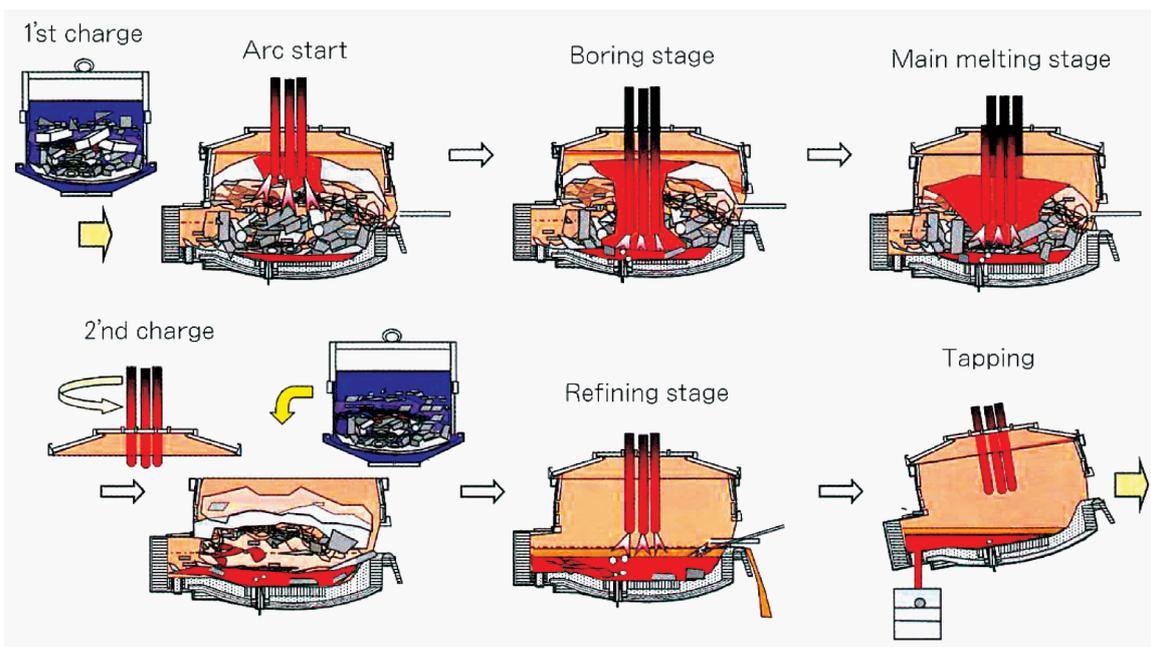


図2 バッチ装入アーク炉操業法 (Online version in color.)

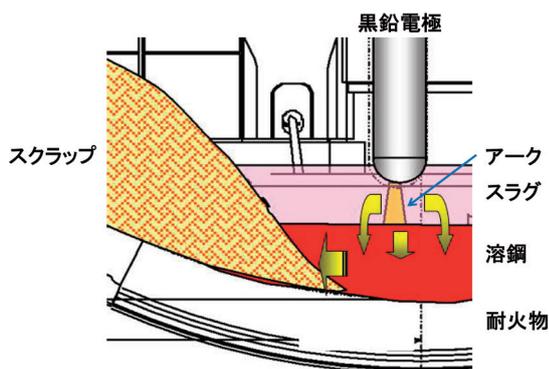


図3 連続装入炉 (Flat-Bath) (Online version in color.)

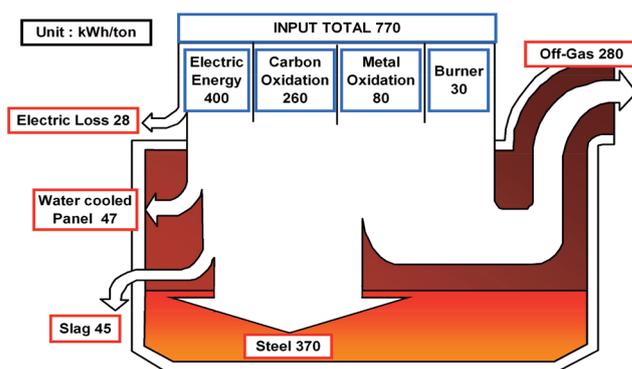


図4 バッチ装入アーク炉のヒートバランス (Online version in color.)

3) シャフト直結型予熱炉

図5はこれら3つの予熱炉と、シャフトおよび連続装入炉(Flat Bath)との関係性を示したものである。

1) 水平コンベア型予熱炉

1980年代後半に誕生した技術であり、その後も改良を加えながら広く世界中に導入されており、スクラップ予熱型アーク炉としては最も導入基数が多いものである。スクラップは水平コンベアで炉体に装入される。この水平コンベアがアーク炉に接続された煙道を通る際に、高温の排ガスと熱交換を行うことによりスクラップ予熱が行われる。煙道中、高温の排ガスはスクラップの上面を流れるため、コンベア内のスクラップ下面での予熱効率は悪く、結果電力原単位の削減効果はそれほど大きくはない。しかしながら、スクラップは炉内に連続的にかつ適量ずつ供給されるため、炉内は常に図3に示したフラットバスの状態となる。このためフリッカや騒音などの発生が小さく、工場外の電力ネットワークへ及ぼす影響も低く抑えることができる。

2) フィンガシャフト型予熱炉

1990年以降、アーク炉本体の上方に縦型のシャフトを配置し、アーク炉から発生する排ガスをそのシャフトに導入して熱交換を行うシャフト型予熱炉が数多く導入された。シャフト内のスクラップは上から下へ、排ガスは下から上へという対向流となるため、熱交換の効率が理論上最も優れたものとなり、大きな電力原単位削減効果を得ることができる。

現在主流となっているものは、シャフト下部にフィンガと呼ばれる水冷の櫛のようなものを設置し、これでスクラップを保持し、フィンガの隙間から排ガスがシャフト内を流れることにより熱交換を行うものとなっている。シャフトから炉内へのスクラップ供給はヒート内で5~6回ほどに分けて行われるため、スクラップを保持しているときはフラットバスに近い状態ではあるが、フィンガを開放してスクラップを炉内に投入した直後はスクラップが電極近くに存在することになる。

また、このタイプのシャフトは基本的に固定されており、

炉体とシャフトは分離できる構造となっている。スクラップの溶解中はシャフトと炉体が接続されスクラップの溶解が進むが、炉内に所定の溶鋼量ができた後、シャフト内のスクラップはフィンガによって溶鋼と分離された状態で、昇温、成分調整を行い、その後炉体のみを傾動させて出鋼を行う。これより炉体とシャフト間には必然的に隙間が生じるため、シャフト内への侵入空気によるスクラップ酸化、さらには歩留の低下が懸念される。

3) シャフト直結型予熱炉

2001年に初号機が誕生し、その後日本国内海外を含め10基の実績がある。シャフトと炉本体が直結し、同時に傾動することが最大の特徴である。シャフトから炉内へのスクラップの供給はシャフトの背面に設置されているプッシャによって行われる。特殊な炉内形状とプッシャの配置により、プッシャ作動中はシャフトから炉内へのスクラップの供給が可能であり、プッシャの作動を停止することによりスクラップの供給を止めることができる。これにより、溶鋼面からシャフト内の空間には、常に連続的にスクラップが存在することになり、最も効率よくスクラップ予熱を行うことができる。シャフトと炉本体の間には隙間がないため、シャフト内への侵入空気が最小限に保つことができ、高い歩留まりを維持することができる。また、スクラップの炉体への供給はプッシャにより、適量を連続的に供給することが可能で、炉内は常に図3に示すようなフラットバスの状態となる。

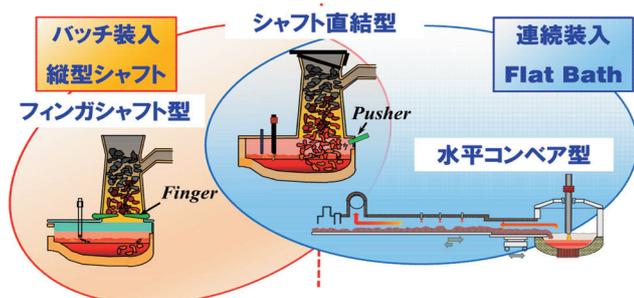
図5に示すように、シャフト直結型予熱炉は、縦型シャフトの中でも非常に高効率の予熱効率を持ちながら、フラットバス溶解の特徴も有するというスクラップ予熱型アーク炉となっている。

3 大型アーク炉

図1に示すように、製鋼用アーク炉でのCO₂排出量はおおよそ0.5 ton-CO₂/ton-Steel というオーダーであるのに対し、高炉—転炉製鋼法ではおおよそ2.0 ton-CO₂/ton-Steel であるといわれている。このことにより、昨今では高炉—転炉をアーク炉に置き換える、という動きが検討/実行されている。ところが、一貫製鉄所での生産性に対応するためには、アーク炉の大型化、高生産性化が必要となり、それに伴い様々な設備的課題が浮かび上がってくる。ここでは、具体的な仕様に対するケーススタディを行い、上記課題に対する考察を行っていく。

3.1 大型アーク炉に求められる諸元

現在スクラップを主原料とした製鋼用アーク炉は、1回あたりの出鋼量が50~200ton、出鋼から次の出鋼までの時間



■ 理論上予熱効率最大

■ 連続安定溶解

図5 スクラップ予熱型アーク炉 (Online version in color.)

(Tap to Tap time = TTT) がおよそ50min程度、というところが一般的である。最終製品も棒鋼や形鋼といったところが主流である。

これに対し現状の転炉は、出鋼量が200~300ton、TTT時間も40min以下となっており、アーク炉への代替を考えた場合もこのような諸元が必要となってくる。また、最終製品を考えた場合、より高級鋼への要求が必要となってくる。

このような転炉代替におけるアーク炉の大型化、高生産性への要求に伴い、設備的に様々な制約、課題が浮かび上がってくる。主な因果関係を表1にまとめる。

3.2 ケーススタディ

これらの課題について検証を行うため、以下のようなケースについて具体的な仕様の検討をおこなった。本ケーススタディでは原料は100%スクラップとした。検討の諸元を表2に示す。

1) AC/DC炉

製鋼用アーク炉には大きくAC(交流)炉とDC(直流)炉がある。それぞれの特徴、短所を表3にまとめる。

図6はそれぞれAC炉、DC炉の模式図である。AC炉では3本の黒鉛電極がそれぞれトランスのR、S、T相に接続され、電流は各相120度ずつ位相をずらして黒鉛電極~溶鋼またはスクラップ間に発生するアークを通じて周期的に向きを変えながら流れる。

これに対し、DC炉は炉底に陽極電極、炉頂側に黒鉛の陰極電極を配置する。電流は炉底電極→溶鋼→アーク→炉頂側電極という順に常に一定方向に流れる。この時、電流に強い電磁力(ピンチ力)が発生し、その電磁力により溶鋼は攪拌されることとなる。さらにこの陽極電極に電気を供給する二次導体の配置を水平に迂回させることにより、溶鋼中の電流に作用する電磁力の強さを調整することができる(ターンコイル)。このターンコイルの導入により、溶鋼の攪拌が強化され、電力原単位が約10 kWh/ton削減できたという例もあり、本ケーススタディでは、ACバッチ装入炉の電力原単位を400

表1 大型アーク炉の課題 (Online version in color.)

要求	制約	対応策
高生産性	電力網弱 (トランス容量UP、フリッカ増) カーボンフリー電力増 電極	直流アーク炉 高効率原料予熱 連続溶解炉
高品質化	直接還元鉄利用	溶銑装入併用

kWh/ton、DCバッチ装入炉の電力原単位を390 kWh/tonとした。

2) 電力原単位

先に述べたように、ACバッチ装入炉の電力原単位を400 kWh/ton、DCバッチ装入炉の電力原単位を390 kWh/tonとした。これに対し、スクラップ予熱型連続装入炉の例としてシャフト直結型予熱炉(ECOARC™)を導入した場合とし、バッチ装入炉に比べ電力原単位が約100 kWh/ton削減するものとして計算を行った。

3.3 トランス容量、最大二次電流値(電極)、フリッカに対する考察

上記のケースにおける、必要トランス容量、最大二次電流

表2 ケーススタディ諸元

出鋼量	ton	300	350		
トランス		AC / DC			
Sc装入		Top-Charge / Flat Bath			
電力原単位	kWh/ton	AC Top-Charge : 400 DC Top-Charge : 390 AC Flat Bath(ECOARC) : 300 DC Flat Bath(ECOARC) : 300			
TTT	min	45	40	45	40
生産性	ton/h	400	450	467	525

表3 AC/DC炉比較 (Online version in color.)

	AC	DC
トランス/電源装置	安価	高価
フリッカ補償装置価格	トランス本体と合わせて考慮が必要	
溶鋼攪拌力	弱い 溶鋼温度は上熱傾向	強い 溶鋼温度均一
電極配置	炉頂3本	通常、炉頂1本 +炉底1基
Sc溶解	ホット/コールド スポットによる不均一	1本電極であれば均一
バッチ装入炉 電力原単位 kWh/ton	400	390 (攪拌効果)
メンテナンス	シンプル	複雑(炉底電極交換)

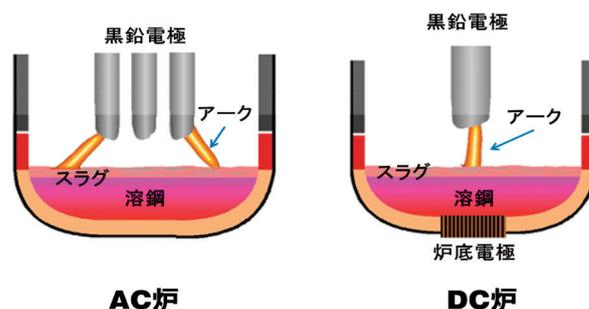


図6 AC炉、DC炉概念図 (Online version in color.)

値、発生フリッカを計算し、それぞれに対する考察を行った。

1) トランス容量

図7は必要トランス容量についての計算結果を示す。

要求される生産性の増加に伴い、必要なトランス容量も増加する。また、バッチ装入型アーク炉の電力原単位が390~400 kWh/tonとしているのに対し、スクラップ予熱型連続装入アーク炉の電力原単位を300 kWh/tonとして評価しているため、必要トランス容量にも大きく差ができる。

前述したように、一般的な製鋼用アーク炉の容量が100~200tonであり、これらのトランス容量も100MVAを超えると「大型」の領域と言われているが、図7に示すような200MVAを超えるトランスは「超大型」の領域となってくる。トランスの大型化は製作工場の制限が出てくることに加え、重量も重くなるため輸送への制限が出てくることと、設置する建屋のコストなどにも大きな影響を与える。

2) 最大二次電流 (電極)

図8は各ケースでの必要最大二次電流の計算結果を示したものであり、それぞれに使用することになる黒鉛電極サイズと構成を示している。通常、AC炉は黒鉛電極が3本、DC炉では陰極側に黒鉛電極を1本という構成である。AC炉に用いる黒鉛電極では、電流が黒鉛電極の表面に集中して流れやすくなり(表皮効果)、黒鉛電極表面の温度が上がるため、表面酸化により電極の損耗が早くなる。一方DC炉で使用する黒鉛電極は、その断面に様に電流が流れるため、局所的な電力集中は起きにくい。以上のことから一般に、同じ電極サイズでもAC炉に用いる電極よりもDC炉に用いる電極のほうが大電流を流せるということになる。

次に、現在流通している製鋼用アーク炉に用いる電極サイズは30インチまでのサイズが一般的であり、わずかではあるが32インチの電極を製造しているメーカーもある。しかしながらそれ以上のサイズは、現時点での需要がないため製造されていない。

このような制限がある中で、大型アーク炉に用いる黒鉛電

極はかなり特殊なケースが必要となってくる。まずAC炉であるが、図8に示すように、生産性の増加に伴い黒鉛電極のサイズアップが必要であるが、530ton/hの領域までならば32インチ電極での対応が可能である。一方、DC炉では通常陰極は黒鉛電極1本という構成だが、今回のケーススタディの中で一番条件が緩やかなもの(DC炉、400ton/h、スクラップ予熱型炉)であっても28インチ電極が2本必要となっている。生産性アップや電力原単位の悪化に伴い、電極サイズも大きなものが必要となってくるが、バッチ装入炉(Top-Charge)で460 ton/h以上の生産性の要求に対しては、DC炉であるにも関わらず、陰極側の電極が3本必要、という検討結果となる。

3) フリッカ

製鋼用アーク炉では溶解中にアークが高速に変形・移動したり、スクラップが崩落するため、負荷変動は極めて大きくまた不規則である。この結果、給電母線に不規則な電圧変動を生じ、同一系統に接続された照明設備等にちらつき(電圧フリッカ)を引き起こす。

日本ではそのちらつきを10Hzの電圧変動に換算した ΔV_{10} を判定基準としている。 ΔV_{10} は1分毎に計算され、評価は一時間にわたって計測して得られる60個の計測値のうち、4番

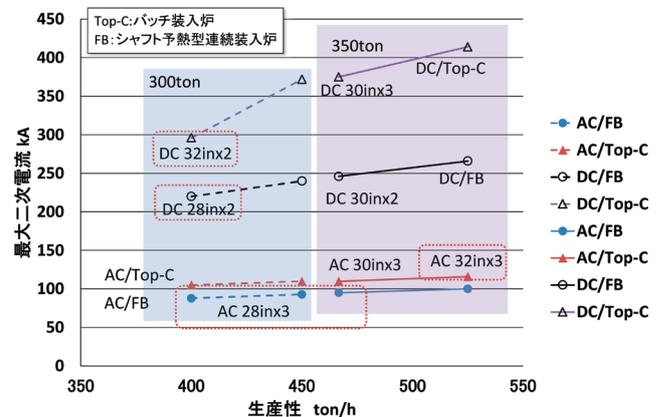


図8 生産性と最大二次電流(電極)の関係(Online version in color.)

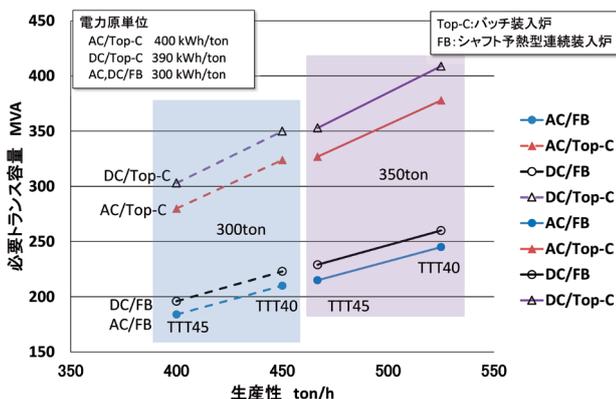


図7 生産性と必要トランス容量の関係(Online version in color.)

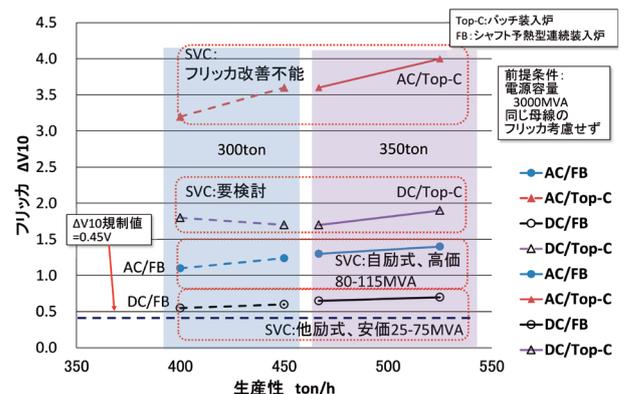


図9 生産性とフリッカ発生量の関係(Online version in color.)

目に大きい値(最大4番目)を評価対象値と選択しており、一般的にその値を規制値として0.45V以下にするように要求されている。

図9は各ケースにおけるフリッカ発生量を示したものである。計算の前提条件として、電源容量は3000 MVAとし、同じ母線の他のフリッカは考慮しないものとした。計算結果ではいずれのケースもフリッカ規制値0.45 Vを上回るため、フリッカ補償装置の設置が必要となる。連続装入炉(Flat-Bath)ではアークが安定しフリッカの発生が低く抑えられるが、連続装入炉/AC炉の組み合わせでは115MVAクラスのフリッカ補償装置が必要となる。一方、バッチ装入炉(Top-Charge)ではフリッカの発生が非常に大きくなるため、バッチ装入炉/DC炉の組み合わせでは規制値をクリアできるか詳細な検討が必要となる。バッチ装入炉/AC炉の組み合わせになると、 ΔV_{10} の値が非常に大きくなるため、場合によってはフリッカ補償装置を設置しても規制値内に改善できないケースが出てくると考えられる。

3.4 直接還元鉄(DRI, HBI)

上記ケーススタディは原材料を100%スクラップとしたが、高級鋼を指向するにはスクラップ中のCu成分が問題となる。このため、DRIやHBIといった直接還元鉄を用いる方法がある。

ところが、これらDRIやHBIの利用割合を増やすということは、上記ケーススタディでの二つの条件をさらに厳しくするものになってしまう。

その一つは、DRI/HBIの溶解電力原単位である。アーク炉において100% DRI/HBIの溶解を行った場合の電力原単位は、その品質によって異なるが500~600 kWh/tonとなる。上記ケーススタディでは一番悪い電力原単位をACバッチ装入炉(Top-Charge)の400 kWh/tとしたが、この条件がさらに悪化することになる。

二つ目の要因はその形状にある。通常、DRIは10~20 mm程度の塊状、HBIは100 mm程度のインゴット状である。予熱シャフト内での通常スクラップを考えた場合、スクラップはつぶされることによる変形などにより非常に不規則な形状をしているが、空隙率は非常に大きく、嵩比重という言い方ではそのほとんどが1.0 ton/m³以下である。これにより、シャフト内での排ガスの通気性が良く、比表面積も大きいため、排ガスとスクラップ間での熱交換が促進される。一方、DRI/HBIは嵩密度では1.5~2.5 ton/m³程度であり、空隙率は低く、また単体で見ても非常に緻密であるため、予熱シャフトに投入した場合でも通常のスクラップに比べて予熱効果は低くなると考えるべきであろう。

以上のことを模式的に表したものが図10でる。これら二

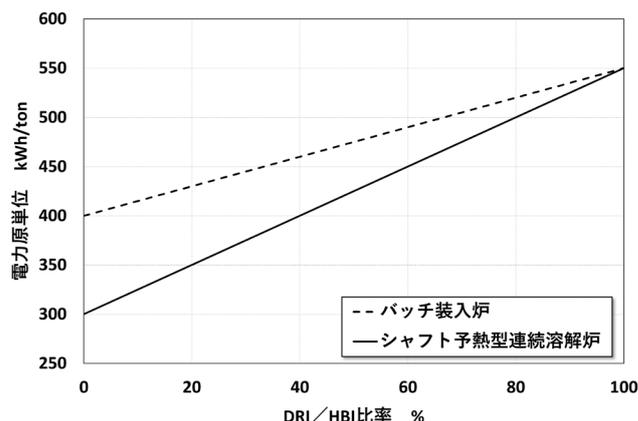


図10 直接還元鉄割合と電力原単位の関係

つの要因のため、製品の品質を向上させるためにDRI/HBIの配合比率を高めるということは、トランス容量、電極、フリッカ補償装置といった設備のさらなる大型化につながる。この問題を解決する方法として、まずDRI/HBIのみを専用の溶解炉にて溶銑とし、この溶銑とスクラップをアーク炉で溶解して溶鋼を得るプロセスも提唱されている。

4 おわりに

今後CO₂排出量削減のために、高炉/転炉による製鋼プロセスを、アーク炉による製鋼法に置き換える流れはますます高まっていくものと思われる。しかしながらそこには、ヒートサイズ(出鋼量)、ヒートサイクル(生産性)、大型トランス、フリッカ、電極、直接還元鉄の利用、といった様々なパラメータが相互に、複雑に影響するため、ユーザー側にはまずは導入のコンセプトをしっかりと定める、ということが大変重要なポイントになってくるであろう。

さらにアーク炉ユーザーには、本稿における省エネ型アーク炉の選択や、本稿では触れなかった今後発展が期待される様々なカーボンニュートラルに関する技術(再生エネルギーの最大活用、カーボンフリー炭材の利用、排出CO₂のメタネーション技術による削減)の導入検討が必要となるであろう。アーク炉ユーザーが、将来のカーボンニュートラル社会の実現へと進むことを期待する一方、我々プラントメーカーもその一助になるよう、今後も様々な技術革新に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 関隆太郎：産業機械，(2012) 2, 16.

(2022年2月15日受付)