

展望

鉄源と製鋼プロセスの変化に関する一考察

An Overview on Historical Progress of Steelmaking Technology in Connection with Raw Materials Supply

下村 泰人

Yasuto Shimomura

(株) 日鉄技術情報センター
客員研究員

林 誠一

Seiichi Hayashi

(株) 日鉄技術情報センター
参与・市場調査部

1990年代に低成長を続けていた世界の粗鋼生産量は、21世紀に入るや中国を中心に高成長に転換した。世界の粗鋼生産量は2004年には10億トンを超え、さらに2005年には11億トンを超える予測さえ出ている。このような状況下で、鉄源の確保は喫緊の課題であり、各鉄鋼メーカーは鉄源の長期安定確保に向け対策を取り始めている。

鉄源としては鉄鉱石とスクラップがあるが、粗鋼生産プロセスとしては、鉄鉱石を使用する場合は高炉-転炉法か直接還元-電炉法となり、スクラップを多量に使用する場合は電炉法や平炉法の採用となるだろう。

主として経済合理性で粗鋼増産の対応方法が選択されることとなろうが、世界の鉄鋼蓄積量の増加と共にスクラップの発生と使用量が増加し、今後もこの傾向が続くことは確かであると考えられる。ここでは世界規模での鉄鋼の蓄積量推移を推定し、粗鋼生産におけるスクラップ使用量との関係を検討した。さらに、幾つかの前提条件の下ではあるが、世界の粗鋼生産量の成長率と鉄源比率の中期的変化について考察してみた。

1 鉄鋼生産と生産プロセスの変化

1865年に英国のベッセマーが溶鋼法を発明して以来、19世紀末には鉄鋼材料は錬鉄から鋼へ移り、高炉溶鉄とスクラップから粗鋼が生産されるようになった。現在は鋼の時代で、多量の鋼鉄と少量の合金鋼とが使用されている。

図1は鉄鉄と粗鋼の生産量および鉄鋼比の推移を示したものである。20世紀の初めに鉄鋼比が1を切ってから1940年頃以降はほぼ0.7の比率で推移してきた。スクラップなしのオール溶鉄操業では理論的には鉄鋼比は1.05程度である。したがって、20世紀になってスクラップの発生量が増加し、粗鋼生産の鉄源としてスクラップの重要性が増大したことを示している。粗鋼の増産が高炉溶鉄とスクラップの両者の増

加で支えられてきたことを示すものである。

粗鋼生産の推移をもう少し詳しく眺めると、時期によって伸び率に著しい差が見られる。すなわち、各時代の粗鋼生産量の伸び率を比較すると、

①1920年～1955年	年平均	3.8%
②1955年～1970年	年平均	5.4%
③1970年～1999年	年平均	1.0%
④1999年～2003年	年平均	5.3%

となっており、この期間でも特に最近の2年間、2002～2003年は7.2%にも達している。②は第2次大戦後の日本、欧州、旧ソ連の発展の時期であり、④は中国の発展の始まった時期に相当している。粗鋼生産量は鉄鋼製品の需要増減に対応して生産されるもので、鉄鋼業が自身で生産量を決めるものではない。これまでも世界の経済成長、技術発展、他の材料の発展、環境問題などが粗鋼生産量に大きな影響を及ぼしてきた。

鉄鋼の生産プロセスについては、パドル法による溶鉄からの錬鉄生産が、転炉による溶鋼に転換され、さらにスクラップの発生増から溶鋼プロセスは転炉から平炉に移行し、20世紀になってからそれにスクラップを使う電気炉製鋼法が加

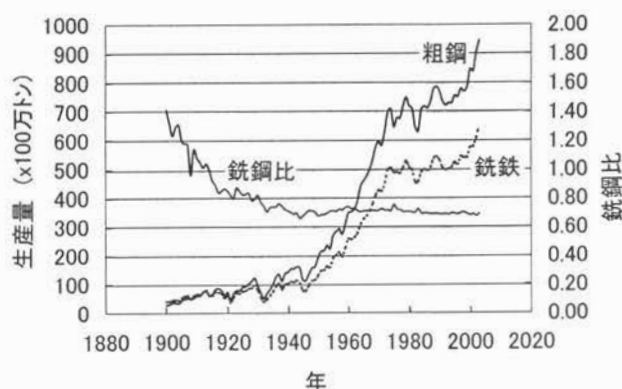


図1 鉄鉄、粗鋼の生産量と鉄鋼比の推移

わった。図2に最近の製鋼プロセスのシェア推移を示した。1952年に純酸素LD転炉が出現してから、平炉と酸素転炉のシェアが逆転し、さらに1980年には電炉法が平炉を抜いて、現在では転炉60%、電気炉35%、平炉5%のシェアとなっている。今後は平炉の時代が終焉し、転炉と電気炉の時代になるであろう。

現在製鋼技術は成熟し、大きなプロセス変化は予測できないが、溶鉄を主鉄源とする転炉とスクラップを主鉄源とする電気炉のシェアに、鉄源の変化がどのように影響するかが今後の重要な問題となろう。ここでは粗鋼生産の鉄源構造からスクラップ発生量を推定し、将来の鉄源変動、ひいては製鋼プロセス変動を考察した。

2 粗鋼生産の鉄源構造と鉄鋼の蓄積量

図3に鉄鉱石供給、鉄鋼の蓄積およびスクラップ循環から構成される、粗鋼生産における現在の鉄源構造を示した。製鋼では主として酸素転炉と電気炉により、溶鉄とスクラップ

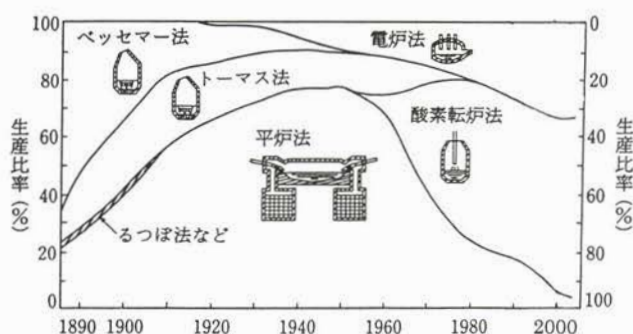


図2 製鋼プロセス別生産割合の推移

を鉄源にして粗鋼が生産される。溶鉄は高炉で鉄鉱石を使って製造される。

スクラップには、鉄鋼の蓄積から発生し回収される老廃屑、機械加工や飲料缶などから直接発生する加工屑やリターン屑および製鉄所内で発生する所内屑がある。製鉄所からの鋼材製品量は、粗鋼からある歩留で生産されるもので、歩留外は製鉄所内で発生する所内屑として循環使用される。したがって鋼材製品の鉄源は、鉄鉱石から造られる高炉溶鉄、各種スクラップ類、および現在は少量ではあるがDRI（直接還元鉄）である。以下ではスクラップ類を合計してスクラップ使用量と称している。なお鉄鋼製品としては鋳物があり、高炉で少量の鋳物鉄が生産される。また鋳物関連のスクラップの循環と使用もあるが、粗鋼に比べて量が少ないのでここでは粗鋼のみに着目している。

この様な鉄源構造から、

粗鋼生産量－（鉄鉄生産量＋DRI生産量）＝スクラップ使用量

ということになる。ここでの（鉄鉄生産量＋DRI）は毎年採掘される鉄鉱石中の鉄分量の合計である。したがって世界の鉄鋼蓄積量は、全ての鉄分の供給源である鉄鉱石のこれまでに使用された、換言すれば採掘された鉄分量の総計で計算できるといえる。すなわち、

世界の鉄鋼蓄積量＝使用された鉄鉱石中に含まれるFeの総量

3 鉄鋼蓄積量の推定計算

鉄鋼蓄積量は鉄の総生産量であるが、ここでは溶鋼の実際の生産が始まり、欧米で粗鋼生産量の統計が得られるようになった1865年から現在までの生産量を対象とした。

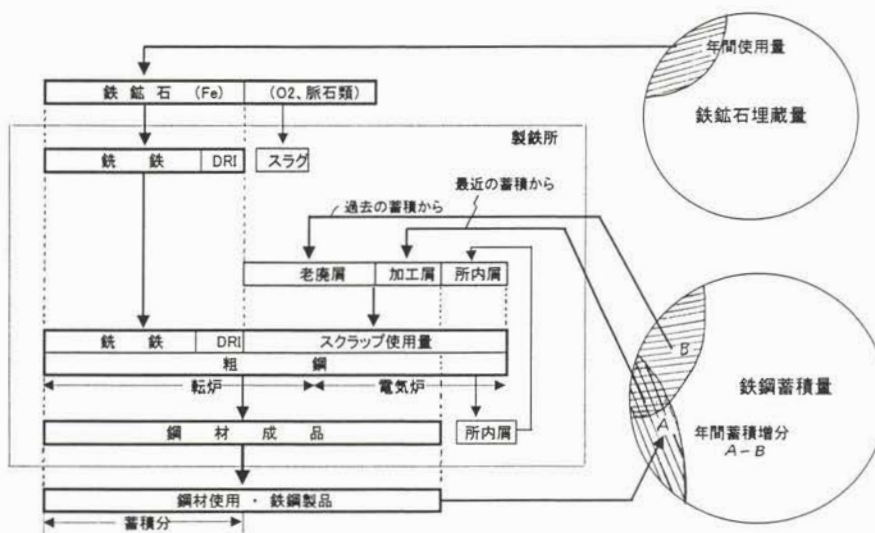


図3 鉄のリサイクルと鉄鋼蓄積のメカニズム

3.1 錬鉄と粗鋼生産量

粗鋼生産が実質的に多くなるのは1880年代からで、1900年の粗鋼は2,900万トンであり、2002年は9億トンを越えて、この100年で30倍以上になった。溶鋼法の発明以来2003年までの合計粗鋼生産量は364億トンである。

鋼がルツボ法で少量生産され貴重な材料であった時に、加工できる鉄として錬鉄が多量生産されて使用されてきた。高炉溶鉄は一部鋳物として使用されたが、大部分がパドル炉で錬鉄生産に使われた。錬鉄の最大生産は1890年の950万トンで、1930年に終焉する。1930年までの錬鉄の合計生産量は約4.6億トンで、粗鋼の1%強に過ぎない。これまでの鉄鋼の合計生産量は粗鋼と錬鉄の合計で、2003年までに約370億トンが生産された。

3.2 銑鉄

高炉溶鉄は20世紀になってから現在まで主として転炉と平炉の鉄源で、それから溶鋼が造られた。銑鉄は炭素を4.5%程度と、その他Si、Mn、Pなどの元素を含んでいる。したがってここでは、銑鉄のFeを95%と仮定して銑鉄中のFe量を計算し、それを鉄生産量とした。2003年までの合計銑鉄生産量は約267億トン、そのFe換算量は254億トンとなる。

3.3 平炉と直接還元での鉄鉱石の使用

スクラップの発生が次第に多くなるや、反射炉でこれを溶解して鋼に精錬する平炉法が発展してきた。これは転炉溶鋼法の後に発明されたが、転炉より品質の良い鋼が大規模に生産できることから、20世紀には転炉を凌ぐシェアを持つようになり、LD酸素転炉が発展するまで最大のシェアを持つ製鋼プロセスであった。平炉でも鉄鉱石を使用して直接に鋼を生産してきたので、この鉄鉱石からのFe量が、高炉銑鉄の場合と同様に鉄鋼の蓄積に加えられる。平炉からのFe生産量を推定すると、平炉最盛期の1960年代に5,000万トン程度になったが、合計すると現在までに約17億トンと推定された。

直接還元製鉄法が本格的な鉄源プロセスとして実用化されたのは、電気炉によるミニミルが米国から発展し始めた1960年以降である。鉄鉱石から直接に鉄を造り、それを主として電気炉で溶解精錬して鋼とする。1990年頃から生産量が増加し、最近では年5,000万トンに近づいている。しかしこれまでの合計生産量はまだ5億トンに過ぎず、含まれる鉄分の平均を91%とすると、これまでのFe生産量は4.6億トンとなる。

3.4 世界の鉄鋼蓄積量

粗鋼生産量はその年の実際の鉄鋼生産量には違いないが、それにはスクラップ使用量が含まれるので、実質的な新しい鉄の生産量は、上述の銑鉄、平炉で使用した鉄鉱石、直接還元鉄に含まれるFe量の合計である。この累計は2003年までで約276億トンとなっている。結局、鉄鉱石からの鉄分の累積がこれまでの世界の鉄鋼の蓄積量になるといえる。図4に粗鋼生産量、Fe生産量、およびその差であるスクラップ使用量の蓄積量推移を示した。最近では著しい粗鋼生産量の伸びから、この20年弱で蓄積量が約100億トン増加した。

4 スクラップ量の解析

毎年の粗鋼生産量から、3.2、3.3の鉄の合計量を引いたものがその年のスクラップ使用量になる。図5に毎年のスクラップ使用量を示した。全体の傾向ではスクラップ使用量は増加しているが、1990年代にスクラップの使用量が停滞し、2000年になって急増し始めている。スクラップ使用の累計は2003年で90億トン以上になっている。

図6は粗鋼生産量に対するスクラップ使用量の割合を示したもので、スクラップ使用量を粗鋼量で割ったものである。1960年代の20%台から、最近では30%前後になっている。鉄鋼生産量の急増から蓄積量が急増し、スクラップの発生増加

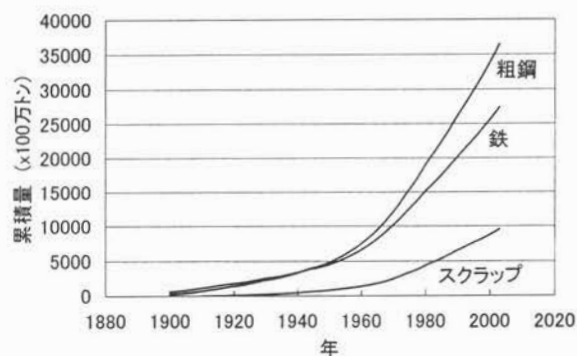


図4 粗鋼、Fe、使用スクラップ累積量の推移



図5 スクラップ使用量の推移

になったためといえる。

スクラップは基本的には、生産された鉄鋼の使用後および過去の蓄積から発生または回収したものなので、発生の定量化が出来ないか検討した。使用された鉄鋼がスクラップ化されるのは、現在から過去のある年を中心とした発生量分布によるものであるが、平均的には20～30年でスクラップになるとされている。このような分布を考えずにある年のスクラップ使用量（以下ではその年を0年と称している）を、その年より前のある年の蓄積量で割った値を、蓄積からのスクラップ発生%として図7のように計算してみた。例えば図7の2000年、20年の点は、2000年のスクラップ使用量を20年前の1980年の蓄積量で割った値で1.8%となっている。

実際のスクラップの使用（発生）量の推移は図5であるが、これでは年ごとの増減が激しいので、図に示したような上限をならしたスクラップ使用量の傾向線を仮定した。1970年の1.7億トンから2000年の2.8億トンまで30年間で年率1.7%の伸びとなっている。最近まで30年の粗鋼とスクラップ使用の伸びを比べてみると、粗鋼の1.3%に対しスクラップ使用の方がやや高い伸びなので、粗鋼生産は転炉から電気炉のシェア増へと少しずつ動いてきたことが理解できる。しかし2000年からは粗鋼が急増し、スクラップの伸びがいつかない状況が展開されていると見られる。

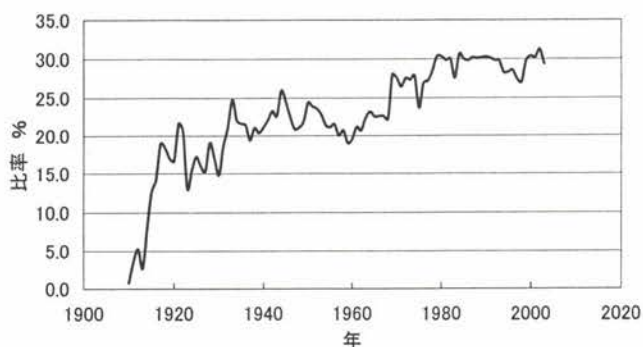


図6 粗鋼に対するスクラップ使用量の割合の推移

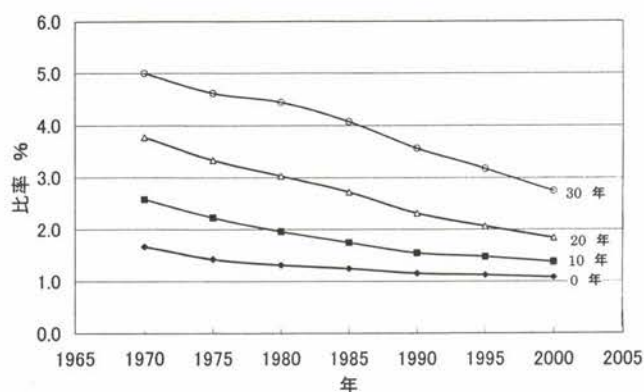


図7 蓄積量に対するスクラップ使用量の割合の推移

このスクラップ使用量と鉄の蓄積量を使って、0年（2000年）から30年（1970年）前まで5年おきのスクラップ使用量比率を計算したのが図7である。非常に良好な傾向線が得られた。しかし蓄積からの発生%は一定ではなく、いずれも徐々に低下する傾向となっている。その低下率は30年前の蓄積で計算したものが最も大で、現在すなわち0年の蓄積で計算したものが低下率は最も小さい。このような低下傾向は幾つかの理由で説明できる。

- ・粗鋼生産量が増加すると蓄積量は増加するが、スクラップ回収量の増加程度はあまり大きくない。回収効率を高めるのは難しい。スクラップ不足になると量の増加より価格アップが起こる。
- ・最近では自動車、容器類、家電製品などの増加でスクラップ化の年数が短くなってきている。
- ・先進国と鉄鋼生産量の増大している発展途上国では、スクラップの発生ないし回収パターンが異なっており、後者ではまだスクラップ発生が少なく。

各種の理由が複合して現在の発生量となっているわけである。本来スクラップの発生は数年前以上の蓄積からであることは確かであるが、図7から見て0年の蓄積でその年の使用量を割った%が最も安定した率を示している。すなわち0年の蓄積量で割ったものが、この10年間は1.1%程度で、10年前の蓄積で割ったものでは1.5～1.4%である。10年前の蓄積で計算したものの方が、変化率がやや大きい。したがって当面しばらくは、0年の蓄積量の1.1%がその年の市中スクラップ発生量としても大きな誤差はなく、かなり正確な推定が出来ると考えられる。

5 今後の粗鋼生産量変動に対する鉄源変化の計算

このように、かなり正確に鉄鋼の蓄積からスクラップ発生量の推定が出来るので、これを使って今後の粗鋼生産量と鉄源配合の関係を推定した。すなわち蓄積からのスクラップ発生量を求め、それを粗鋼から引いたものが鉄の生産量となり、それが蓄積されることを繰り返し、2020年までの計算を試みた。今後の粗鋼生産は3つの伸び率を仮定した。

5.1 蓄積からのスクラップ発生量の推定

粗鋼生産量は1970年～2000年頃までは年率0.9%の伸びであったが、2000年から現在まで5%の伸びに急上昇した。ここで1%、2.5%、5%成長の3つのケースを考えてみた。2003年に9.45億トンであったものが、5%成長では2019年には21億トンに、2.5%、1%成長ではそれぞれ14億トンと11億トンとなる。

蓄積からのスクラップ発生量(使用量)は、それまでの蓄積量に対する割合として計算される。しかし、正確な将来の蓄積量は推定計算からしか求められないので、ここでは10年前の蓄積量から推定することとした。例えば2003年のスクラップ量は、10年前の蓄積量である217億トンに発生率の0.0135を掛けて求めた。過去5年の発生率は1.4%であるが、図の傾向から将来少し低下すると考えて1.35%を使用した。

次に蓄積量の変化を計算した。粗鋼生産量からスクラップ使用量を引いた値が銑鉄とDRIなど鉄源からのFe量となる。この鉄量が新しい蓄積量となり前年の蓄積に加えられる。その新しい蓄積量を使って次の年のスクラップ量が計算される。2003年までの蓄積量はこれまでの実績から計算できるが、2013年以降の計算に用いる10年前の蓄積量は、このようにして逐次計算される。粗鋼5%成長では、2003年から2019年までの16年間に蓄積量は274億トンから434億トンと160億トン増加し、粗鋼1%成長では、274億トンから378億トンになる。

3つのケースで仮定した粗鋼生産量からスクラップ使用量を引いたものが各年の銑鉄とDRIの合計Fe量となる。ここでは平炉は考慮していない。スクラップ以外の鉄源については、DRIが現在程度の伸びで推移した場合と、かなり伸びが増大した場合の2つのケースについて計算した。DRIが増加すると銑鉄の必要量は減少する。

今回の計算では、ある年のスクラップ発生量は、図7の解析結果から10年前の蓄積量の1.35%であるとし、この傾向が2019年まで続くものと仮定したが、この点は問題であろう。今後、将来の変動を仮定して誤差の程度を評価しておく必要がある。

5.2 粗鋼に対するスクラップの割合の変化

このようにして計算されたスクラップ発生推定量を使って、粗鋼生産量に対するスクラップ比の変化を計算し、結果を図8に示した。

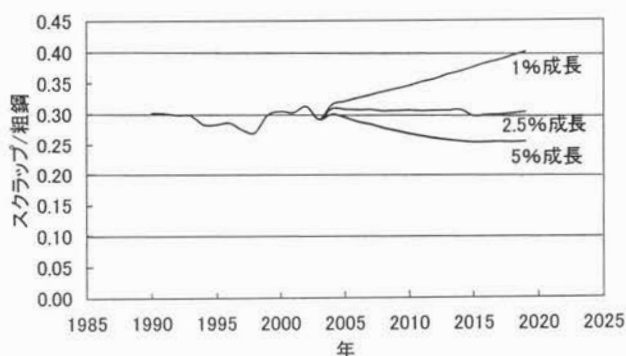


図8 粗鋼に対するスクラップ割合の変化予測

スクラップ使用量/粗鋼生産量(%)

粗鋼生産量の伸び	2003年	2019年
5%/年	30	25
2.5%	30	30
1%	30	40

粗鋼生産量の伸びが大だとスクラップ比が低下し、転炉割合が増大する。粗鋼の伸びが小さいと次第に電気炉割合が増加することとなる。この比率は各国で大幅に差があり平均値は余り意味がないが、製鋼プロセスのシェアに直してみると、世界平均では現在転炉鋼60%、電気炉鋼35%、平炉鋼5%となっている。平炉がなくなるとして、粗鋼生産の伸びが大きいと転炉鋼の比率が65%に電気炉が35%程度になり、粗鋼生産の伸びが小さいと転炉が55%、電気炉が45%程度になると予測される。中間の伸びであると、現状が維持されると思われる。

6 今後の鉄源と製鋼プロセス変化の考察

6.1 世界の鉄源変化について

今後も多量の鉄鋼が生産・使用され、したがって鉄鋼蓄積量が増加し、蓄積された鉄鋼からのスクラップ発生量も増加する方向にある。今後の粗鋼生産量の伸び率の変化は、鉄鋼蓄積量の増加速度を変化させ、それが何年後のスクラップ発生量の変動、すなわち粗鋼生産におけるスクラップの使用量に影響する。これに対応して、粗鋼生産の伸びにおいつかないスクラップの不足分を、その他の鉄源である銑鉄とDRIで埋める必要がある。地球環境とエネルギー経済的には、スクラップを最大限に使用して、不足分を銑鉄やDRIで補って、粗鋼生産を継続することが重要である。鉄鋼の使用寿命を延ばすと共に、スクラップは回収効率を高めて、粗鋼生産のスクラップ比を高めることは、地球環境対策としても望ましい。

ここで計算したように全体論としては、将来のスクラップ発生(使用)量をかなり正確に推定できるので、今後の粗鋼生産量の変動に対して、製鋼の経済性、製鋼プロセス技術面、地球環境問題などの観点からスクラップの最も望ましい使用方針を検討して行くべきであろう。しかしスクラップ事情は各国で大いに異なっているので、当該国の製鉄規模、鉄鋼蓄積量、スクラップ需給、製鋼技術などによって、コストを含めたスクラップ使用の経済性にかかなり差があることに留意して、詳しくは各国ごとに検討される必要がある。

6.2 粗鋼の成長率と鉄源の関係

1) 粗鋼生産が5%の高成長の場合

スクラップ発生の伸びより粗鋼生産の伸びが大なので、16年先には粗鋼生産に占める転炉鋼比率は70%から75%へ5ポイント上昇する。鉄源としては銑鉄とDRIの増産が必要となる。鉄源需給の逼迫からスクラップを含めて鉄源コストが上昇傾向となる。

高成長は特に発展途上国で著しいので、これらではスクラップ不足のために銑鋼一貫製鉄所の建設が増加する可能性もある。これに対し先進国では、大規模な建設には慎重で、むしろ生産性、稼働率の向上で増産に対処することになるだろう。スクラップの不足で電炉比率は低下する。

2) 粗鋼生産が1%の低成長の場合

1%程度の低成長が続くと、電炉鋼が粗鋼に占める比率は現在の30%から16年先には40%程度的大幅な上昇になる。このため電気炉の建設が進む。スクラップ貿易も拡大し、先進国ではスクラップ品質への関心が高まる。この傾向は先進国ほど強く、電気炉への転換が急速に進むだろう。

3) 粗鋼生産が2.5%の中間的成長の場合

鉄源から見て現在程度の粗鋼生産に占める転炉、電炉鋼比率は維持されるだろう。したがってスクラップ以外の高炉溶銑かDRIの能力を少しずつ伸ばす必要がある。しかしこの場合は、先進国と途上国では対応に大きな差が出るかもしれない。先進国ではスクラップは余剰気味で電気炉への転換が進むが、成長の大部分は途上国が占めるので、高炉・転炉の建設が行われれば電気炉のシェアはあまり増えないだろう。

6.3 わが国の場合

わが国の場合は上述の先進工業国とほぼ同じ状況となるが、それらとは少し異なった特質もあるので、違いをまとめてみた。

1) 日本は電力コストが割高なことや、巨大銑鋼一貫製鉄所のシェアが極めて大で低コストの溶銑が生産されるために、転炉法のシェアが先進国より高くなっている。したがってスクラップが余剰傾向になっても、なかなか電炉法のシェアが高まらないで、余剰スクラップが輸出される状況になっている。

2) 世界の粗鋼生産の伸びが停滞、低成長になると、国内の生産も停滞または減少傾向となるだろう。上述の理由で電気炉への転換はなかなか進まず、高炉の出銑比を下げたてて操業しつつ、余剰スクラップは輸出に回し、転炉法のシェアがあまり下がらずに維持される。また鉄鋼製品の輸出が増加する。

3) わが国では銑鋼一貫製鉄所新設の動きはなく、わが国にとっては世界の粗鋼需要が低成長することが最も望ましいシナリオである。その時には、設備生産性を高めつつ、徐々に増加するスクラップを吸収するために電炉法のシェアを高め、同時に転炉でもスクラップ使用量を高める努力を行うことなどが出来る。しかしスクラップの回収効率が維持されれば、鉄鋼蓄積の増加に比例してスクラップ発生量が増加して行くので、スクラップに含まれるCuなどの不純物対策に一層の関心が高まるだろう。

6.4 スクラップの重要性

今回の解析で製鉄におけるスクラップのきわめて重要な位置付けと、蓄積からのある程度の発生量の定量化が可能となった。鉄鋼の蓄積量は増大するばかりなので、スクラップ発生量も増大して鉄源としての重要性は増すばかりである。このため、これまで後回しになってきたスクラップの世界全体の規格化や鉄源としての標準化を急ぐべきである。

参考文献

- 1) 王寺睦満, 西野 誠: ふえらむ, 7 (2002), 178.
- 2) Paul Tardy and Gyula Karoly: Stahl und Eisen 124 (2004) 6, 45.
- 3) Rudolf Ewers, Walter Scholl and Rolf Willeke: Stahl und Eisen 123 (2003) 4, 47.
- 4) 林 誠一: 転換点に立つ日本の鉄リサイクル, 日鉄技術情報センター, (2001)

(2004年12月7日受付)

下村泰人氏は2005年3月28日日本稿を残して急逝されました。ご冥福をお祈り申し上げます。(会報委員会)