

## 高炉に代わる革新的製鉄法—マイクロ波加熱製鉄—

(東京工業大学名誉教授) ○永田和宏

Innovative ironmaking method to replace blast furnace – Microwave heating ironmaking -  
(Prof. Emeritus of Tokyo Institute of Technology) ○Kazuhiro Nagata

### 1. Ironmaking using powdery iron ore

Tatara ironmaking is a method of directly producing pig iron using fine powdery iron sand with a diameter of about 0.1 mm and is the only method in the world for 4,000 years. The energy of ironmaking is high temperature gas obtained by burning charcoal or coke with air. In the blast furnace, walnut-sized resources are used to maintain air permeability and required to have strong crushing strength. Then, it takes 6 to 8 hours to produce pig iron. On the other hand, Tatara produced pig iron in 30 minutes because the specific surface area to the volume is exceptionally large. The furnace is a box with a height of 1.2 m and is devised to maintain air permeability without scattering iron ore powder. Pig iron and steel produced by Tatara have a low concentration of impurities such as phosphorus and sulfur and are resistant to rust and easy forge welding. However, these methods rely on carbon required for heating, reaction heat and reduction reaction of iron ore. Modern blast furnaces require 0.5 tons of coke to produce 1 ton of pig iron. This produces 2 tons of carbon dioxide per 1 ton of pig iron.

Kobe Steel has developed ITm3. This produces pig iron in 15 minutes by heating carbon-composite pellets of a mixture of powdery iron ore and coke with radiant heat. This method uses carbon only for reduction reaction in mass balance.

### 2. High-speed pig ironmaking by microwave heating

Radiant heat has disadvantage to heat resources because of a short wavelength. Because microwave has longer wavelength of  $10^5$  times than radiation heat, iron ore and coal generate heat itself with the absorption efficiency close to 90% and produce pig iron in 15 minutes. The phosphorus concentration in pig iron is lower by an order of magnitude than blast furnace. The microwave furnace of 20kW magnetrons with 2.45GHz produces pig iron continuously. The microwave furnace of 120kW klystrons with 2.45GHz has achieved a daily production of 240kg at 44kW. Microwave utilization efficiency is 40%.

It is important how to isolate the volatile components such as dust, moisture and tar generated in the reactor from the microwave systems. Effective partition walls are porous refractories such as boards. Conventional bricks melt at  $1000^{\circ}\text{C}$  or higher by self-heating. The microwave intensity should be over  $13\text{ kW/m}^3$ , the volume of resources in applicator should be increased under consideration of the penetration depth of about 10 cm.

### 3. Regionally distributed ironmaking system

Modern blast furnace has a daily production capacity of 10,000 tons and a steel work produces over 300 million tons of steel. Currently, of the 100 million tons of crude steel produced per year, 60 million tons are made in blast furnaces and converters, while 40 million tons are made by melting scrap in electric furnaces. This method is expected as a means for reducing carbon dioxide emissions. Japan has been exporting scrap since the 1990s, and the amount of steel accumulated has continued to increase to 1.4 billion tons in 2018. Most of them are waste scraps containing impurities such as copper in automobiles and home appliances, and it is necessary to dilute them with new pig iron to reduce their concentration. Scrap is a locally distributed with limited collection. Then, several hundred tons / day of virgin pig iron will be required for a work with electric furnace.

*Keywords : powder ; carbon ; iron ore ; ironmaking ; microwave*

### 1. 粉鉄鉱石を利用した製鉄法

たたら製鉄は、直径約 0.1 mm の微粉末の砂鉄を原料に用いて直接銑鉄を製造する製鉄法で、世界の製鉄 4 千年の歴史上唯一の方法である。製鉄のエネルギーは木炭やコークスを空気で燃焼して得られる高温ガスである。高炉では通気性を保つためくるみ大の塊の赤鉄鉱石と炭材を用い、銑鉄になるまでの時間は 6~8 時間かかる。高炉の高さも高く原料には圧壊強度が要求される。一方、微粉末の砂鉄は難還元性の磁鉄鉱であるが、体積に対する比表面積が非常に大きいので 30 分で銑鉄が生成する。たたら製鉄炉は高さ 1.2m の箱型炉で、粉鉄鉱石を飛散させず通気性を保つ工夫がなされている。たたら製鉄で製造した銑鉄や鋼はリンや硫黄などの不純物濃度が低く、錆び難く鍛接が容易である。しかしこれらの方法は、原料の加熱から反応熱、還元反応に必要な炭素全てを炭材に依存しており、現代の溶鉱炉では銑鉄 1 トン生産するのに 0.5 トンの炭材を必要とする。これは地球温暖化の原因物質の炭酸ガス 2 トンになる。

神戸製鋼所は粉鉄鉱石とコークス粉を混合した炭材内装ペレットを輻射熱で加熱し、15 分で銑鉄を製造する ITm3 を開発した。この方法の特徴は、原料の加熱と酸化鉄の炭素還元反応熱を輻射熱で与えるので、炭素は鉄鉱石中の酸素を取る分だけ必要で炭酸ガス排出を半減できる。

### 2. マイクロ波加熱高速銑鉄製造法

輻射熱は波長が短く、鉄鉱石から固体の鉄が生成する反応では非常に効率が悪い。照射表面しか加熱されないからである。これを  $10^5$  倍波長の長いマイクロ波で加熱すると、鉄鉱石と炭材自身が発熱し吸収効率は 90% 近くになり、15 分で銑鉄が生成する。2.5kW、2.45GHz のマグネトロン 8 台 (20kW) で加熱した連続製銑装置では銑鉄中のリン濃度は高炉より 1 桁かった。30kW、2.45GHz クライストロン 4 台を用いた連続製銑装置では 44kW で日産 240 kg を達成した。マイクロ波利用効率は 40% である。

この方法では、反応装置内に発生する粉塵や水分、タールなどの揮発成分とマイクロ波発生装置および導波管を如何に隔離したうえでマイクロ波を原料に照射するかが重要である。隔壁で有効なものにはボードなど多孔質の耐火物である。従来のレンガは  $1000^{\circ}\text{C}$  以上で自己発熱し溶解する。還元反応を起こさせ効率を上げるためには、マイクロ波強度を  $13\text{kW}/\text{m}^3$  以上にし、浸透深さ約 10 cm を考慮して被照射物の体積を大きくし、マイクロ波を全面から照射することである。

従来のマイクロ波発生装置は真空管方式であり、発生効率は 50% 程度である。近年開発された GaN を用いた固体素子は発生効率が 80% である。出力は 500W であるが集積が可能で、フェーズド・アレイ方式で伝送方向を制御できる。

### 3. 地域分散型製鉄システム

現在、溶鉱炉は巨大になり生産能力は日産 1 万トンである。世界から優良な原料を大型タンカーで運び、製品を世界に輸出している。しかし、この方法は大量の炭酸ガスを排出する。現在、粗鋼生産量 1 億トンの内、6000 万トンは溶鉱炉と転炉で作られているが、4000 万トンはスクラップを電気炉で溶解して作られている。この方法は炭酸ガス排出量削減手段として期待されている。我国は 1990 年代以降スクラップを輸出しており、鉄鋼蓄積量は 2018 年には 14 億トンで増え続けている。多くは自動車や家電製品で銅等の不純物を含む老廃スクラップであり、その濃度低減のため新規銑鉄で薄める必要がある。スクラップは収集に限界があり地域分散型製鉄システムである。そこで必要な新規銑鉄は数 100 トン/日であろう。