



製鉄技術の変遷と東工大

- ・本学を中心とする研究チームが製鉄の起源を実証的に証明
- ・日本初の平炉による製鋼を実現した異色の蔵前人
- ・戦後の貧しかった頃のアイディア勝負から生まれた革新技術
- ・カーボンニュートラル・水素社会を目指した製鉄プロセスの開発

製鉄というと溶鉱炉でコークスを燃焼させ、鉄鉱石から鉄分（銑鉄）を溶出させれば完了というイメージが強いが、実際にはもう1段階経てはじめて、俗にいう鉄（鋼、スチール）ができる。第1段階目は「製銑（せいせん）工程」、第2段階目は「製鋼（せいこう）工程」と呼ばれている。第1段階目の産物である銑鉄には炭素分や不純物が多く、硬いがもろいという欠点があるため、銑鉄から炭素や不純物を除き、粘り気があつて硬い鋼にすることが不可欠なのだ。本稿前半では、人類の鉄利用史を概観し、製鉄の起源を実証したのが本学の研究者であることを強調した上で、上記の第2段階目の製鋼技術の国産化に職を賭して挑んだ我が先輩「蔵前人」を紹介する。後半では、酸素の安価な大量生産法の開発を通して製鋼法の効率化に寄与した大山義年教授（後の学長）らの研究を紹介する。終戦直後の貧しい国状から生まれた成果である点も印象的だ。後半の未来編では、電子レンジと同じ原理に基づく「マイクロ波製鉄」、「水素還元製鉄」、「一酸化炭素 CO による直接製鋼」など、カーボンニュートラル・水素社会を目指した製鉄プロセスの研究を行っている元金属工学科グループの話題を提供したい。

1. 鉄利用の歴史（あらまし）

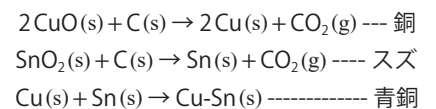
宇宙由来の鉄（鉄隕石、隕鉄）

地球には年間数千トン（大きいものに限っても数十トン）の隕石が落下している。その内、鉄ニッケル合金（含量比約9:1）を主成分とする隕石（隕鉄）は、約5%と見積もられている。金属の製錬技術がまだ無かった古代の西アジアや中国では、この隕鉄を割る、削る、研磨するなどして道具として使われ始めた（3500～4000年前）。その後、隕鉄を鍛造し刀剣（エジプトの王墓の副葬品は紀元前14世紀のものと推定されている）等が作られるようになったが、量が限られていたため用途は限定的にならざるを得なかった。

人類史の時代区分（石器時代→銅器時代→青銅器時代→鉄器時代）にもなっているように、私たちの先祖が最初に利用した金属は、銅（高純度の自然銅と加熱精製銅；融点 1083℃）、錫（ス

ズ、融点 232℃）、続いて銅とスズの合金である青銅（ブロンズ、融点 875℃）と考えられている。青銅の発明（約6000年前）は、偶然のできごとだったのか、あるいは長年の試行錯誤の末に実現したのかははっきりしない。いずれにしても、人類は石器時代に自然発火から学んで人工的に火を利用するようになり、燃料として天然の「木」（薪）よりも格段に強い火力が得られる「木炭」を作る技術を確立したことが、農耕・狩猟・戦争・芸術用の青銅器の量

産を可能にし、人類の営みに一大変革をもたらしたといえるだろう。



鉄器時代の幕開け

製鉄法の分類と名称には分かり難いところもあるので、以下では、(1) 初期の直接法（半熔融状態で高炭素濃度の鋼を得、鍛造等で炭素を減らして通常の鋼を得る）から (2) 高炉によって



① 製鉄発祥の地とされる古代オリエントのアナトリア高原（現トルコ）。

完全に溶融した銑鉄を得、それをさらに平炉や転炉によって精錬する間接法（2段階法 or 溶融法）へと変化し量産体制が築かれたと理解すると分かりやすい。前近代的製鉄法では、弱い還元雰囲気だったため、不純物濃度の低い鋼が直接得られた。

製鉄の起源を実証的に証明したのは東工大チーム！

人類はどのようなきっかけで鉄を利用するようになったのかを明らかにする試みは、製鉄史のみならず人類史においても最重要課題の一つだが、これに答えたのが本学の永田和宏教授（1969 金属, 1975 Dr, 1992 教授, 2009 名誉教授 & 藝大教授）らのグループだ。^(注1)

鉄器時代の始まりは偶然の発見によると考えられている。場所は、古代オリエントのアナトリア高原（現在のトルコ付近、図①）。時は青銅器時代後期（約 4000 年前）。このアナトリア地方に住んでいた人々が「銅」を精錬する際に鉄鉱石を加えて、銅鉱石中の珪砂分をファイアライト（ $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ ）溶融スラグなどにして浮上させ除去する際に^(注2)、たまたま炉内の還元状態が少し強くなって、偶然、鉄分が得られたのが始まりではないかと考えられている。^(注3)

永田さんたちは、この古代銅製錬から製鉄に至る技術の連続性を証明すべく、模擬的な古代銅製錬炉を用いて実証実験を行い、炉高が 1 m 以上になると酸素分圧が低くなり（炉下部温度 $> 1300^\circ\text{C}$, 酸素分圧 $< 10^{-12} \text{ atm}$ ）、製鉄が可能になることを世界で初めて確認することに成功した。この特筆すべき成果は、永田さんらの徹底した冶金学的アプローチの勝利といえるだろう。雑誌『金属』の最新号（2023 年 10 月号）で特集が組まれているので参照されたい（図②）。^(注1)

その後、インド・ヨーロッパ系諸族の大移動がおり、ヒッタイト民族がアナトリア高原に移住してきた。そこ



② 雑誌「金属」2023 年 10 月号。特集テーマ：古代製銅法から鉄製法発見の可能性を探る。

で原住民と混血しながら高度な文明を築くことになるが、その過程で上記の「製鉄」技術を継承・高度化し、鉄器さらには 2 輪戦車までを保有する強力な軍事力を誇るようになった。ついにはメソポタミア文明圏の一部をも征服し、強力なヒッタイト王国を建設した（図①ピンク色）。ヒッタイトの製鉄技術は門外不出とされたが、500 年ほどで（紀元前 1100 年頃）王国が滅びると、その技術は周辺国へと広がった。拡散経路はアイアンロード（Iron Road, 図③）と呼ばれているが、ユーラシア大陸北部の針葉樹林など木々が生い茂った場所に接するルートとなっているのは、燃料（熱源 & 還元剤）としての“木炭”の重要性をよく物語っている^(注4)。シルクロードで絹の交易が盛んになる 1000 年以上も前の話だ。



③ 製鉄技術の東方への拡散ルート。ヒッタイトで開発された当初の直接法は、中国の漢ではいち早く間接法に効率化されたが、長らく門外不出とされた。

木炭よりも燃焼効率が高いコークスは 17 世紀にイギリスで発明され、産業革命（18 世紀中頃から 19 世紀初頭）の原動力になった。コークスは石炭を高温で焼いて作るの^(注5)、製鉄燃料用の木炭（木材）の消費量が減って、英国は森の消失をかうじて免れた。しかし、石炭中の硫黄 S が SO_x ガスとして放出されるので大気汚染はひどくなった。

コークスの発明が鉄の高度利用と量産を促進

コークスは石炭を乾留して、不純物や揮発成分を除き、炭素部分のみにした固体燃料で還元剤としても働く。燃焼に際しては（1）木炭よりも高温が得られ、鉄鉱石（ Fe_2O_3 ）中の酸素を取り除き鉄分を取り出す効率が向上した。高炉中は強い還元雰囲気のため、イオウ（S）やリン（P）が銑鉄中に溶解する。これらを除くために、石灰石（ CaCO_3 ）を入れ CaS やリン酸カルシウムとして S や P をスラグ中に回収除去する。それでも S や P の除去が現代に至るも重要な課題となっている。（2）コークスにはイオウ S やリン P などの不純物が少ないため良質の鉄分が得られる。（3）高強度の特殊な石炭（強粘結炭）由来のコークスは、木炭よりも強固で、高温での使用に耐え高炉内でも潰れないので、コークスと鉄鉱石^(注6)を高炉に入れて工業的規模で処理することが可能になり、そして何よりも（4）コークスは木炭よりも価格が安く、鉄の利用分野の広がりに貢献した。

日本における製鉄の歴史

アナトリア地方（現トルコ）を起点とする製鉄技術は、ヒッタイト（Hit-tites）、スキタイ（Scythia）を経由してユーラシア大陸を横断し、東アジアに到達後に 2 経路に分岐し、そのまま東進した北路はモンゴルの「匈奴」に、南下した南路は BC 600 年頃 中国に到達し、「漢」時代には大々的に銑鉄を作っていた（図③）。Iron Road が南北に分岐後、どのルートを経て製鉄技術が日本にも

たらされたかは不明だが^(注7)、明らかに中国の影響を受けており、次のような説が有力だ。

朝鮮半島との交易が盛んになった6世紀後半に、朝鮮半島から渡来した技術者によって製鉄法と銑鉄を炭火で加熱して炭素濃度を下げる脱炭法（大鍛冶）がもたらされ、木炭源となる森林が豊富で砂鉄の取れる山陽地方を中心に各地に広まり、その後、出雲、広島、兵庫県北部、青森県久慈川に産地が集約された。その過程で日本独自の発展を遂げ、「たたら製鉄」として江戸中期に技術の完成をみたと言われている。^(注8)

製鉄法の原型である塊錬鉄直接製鉄法では、鉄鉱石や砂鉄などを粘土製の炉で比較的低い温度（1300℃前後）で加熱し、完全に溶かさずに半熔融状態のまま還元して得られる海綿状の鉄塊（鑄鉄、銑鉄）を再度加熱して製錬・鍛造し、不純物を搾出・除去するとともに、炭素量も調整することにより強靱な「鋼」を得ることができる。銑鉄・鑄鉄の脆さを克服する上記手法（焼き鈍し技術）が開発されたのは紀元前5世紀ごろと推定されている。Iron Roadの北路の終点「匈奴」でもこの直接法による製鉄が行われていたことを示す遺跡が見つかった。^(注9)

一方、中国では南北で異なる製鉄法が発達した。南の長江下流域（江南）には、おそらくオリエントやインド経由で上記の直接法が伝わり、北の黄河流域（華北）では現代製鉄の標準となっている間接法（溶融還元製鉄法）にまで発展した。この先進的な間接法は、より高い温度（1200℃以上）を必要としたが、世界に先駆けて中国で実現できた理由として、陶器の製作のために炉を高温にする技術が発達していたことと木炭の代わりに石炭（無煙炭）を使ったことがあげられている。間接法は溶融還元法ともいわれるように、鉄鉱石を高温に加熱して溶融しながら炭素を溶け込ませて還元し、鉄を得る。第1段階では溶融した高温の鉄は大量

の炭素を吸って脆い銑鉄として回収され、第2段階でこの銑鉄を再度加熱溶融し、銑鉄に含まれる炭素を燃やして炭素量を調整することで強靱な鋼を得ることができる（図④、⑤）。漢民族の脅威となっていた匈奴との関係もあって、漢王朝は独自に開発した製鉄法を門外不出として秘匿した。古代では、製鉄技術の優劣は戦闘用具に最も反映され、民族の存亡に直結したのだ。

東工大が先導した関東における前近代製鉄の研究

東工大製鉄史研究会と尾崎前山製鉄遺跡

関東各地でもたたら製鉄が行われていたことを示唆する鉄滓（こうさい）が見つかったが、それだけでは製鉄の証拠にならない。別の場所で作った銑鉄を持ってきて、鍛冶炉で精錬していただけかもしれないからだ。この問題に興味を持った科学技術史家の道家達将教授（1963 本学助手、67 助教、73 教授、89 名誉教授）が中心になって、1975 年頃に「関東たたら製鉄史研究会」（後の東京工業大学製鉄史研究会）が結成され、茨城県八千代町尾崎前山製鉄遺跡から出土した各種鉄滓（てっさい）の（1）化学組成分析によって古代製鉄法の原理に迫る研究や（2）金属工学的な組織観察・解析によって古代鉄や鉄滓がいかなる製造過程を経て生成されたかを明らかにしようとする学際的研究が行われた^(注10)。さらに、（3）考古学的解析等も併せて「尾崎前山製鉄炉」は9世紀頃（平安時代）に操業したと推定された。この時期は、地方の豪族が新田開発に必要な農具や領地を守る武器を作るために鉄が必要になった時期で、日本各地で製鉄が行われるようになったと考えられる。炉に関しては、従来は9世紀頃の竪型の炉と考えられてきたが、その後の研究の進展で、8世紀にさかのぼる箱型の炉だった可能性も指摘されている。

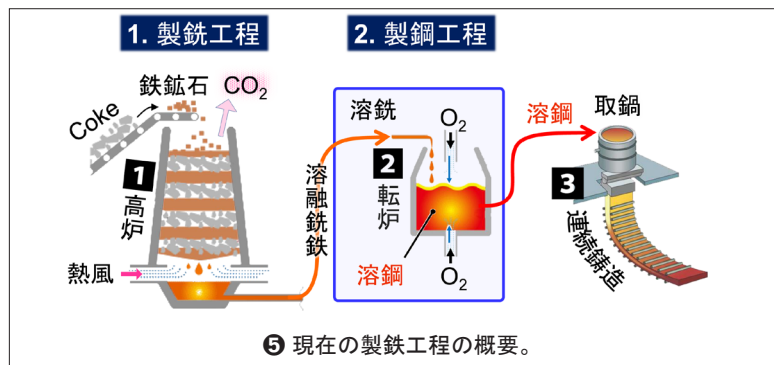
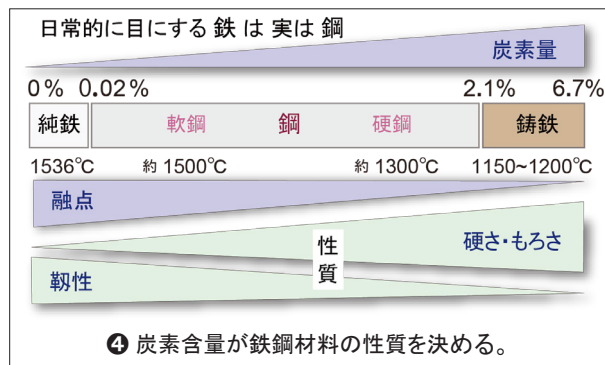
迫られた大量生産体制の確立^(注11)

「たたら」の産物は良質で日本刀に代表される「鉄の芸術品」までも生み出した。炭素含有率が1.3～1.5%の「玉鋼」は現代の量産技術では作り出せない究極の「鋼」と称賛されている。しかし、たたら製鉄では、1トンの鉄を作るのに4トンもの木炭と砂鉄がそれぞれ必要で、しかも毎回炉を壊し、新しく作り直さなければならないことから、明治維新以降の急速な鉄の需要拡大にはとても対処できるものではなかった。従って、西洋で発展を遂げていた「高炉」技術の導入による大量生産が急務となっており、実際、長崎の出島経由でもたらされる情報等を参考に、薩摩藩（1854）や北海道古武井（1855）で高炉法が試みられたが不成功に終わっていた。そんな中、1857年によく釜石で日本初の洋式高炉が稼働した（次節）。

日本近代製鉄の父・大島高任

盛岡藩に生まれた大島高任（たかとう、1826～1901）は、17歳の時に江戸に出て蘭学を学び、さらに長崎で砲術・採鉱・精練等の習得にも努めた。これらの知識を背景に、オランダの製鉄・鑄造関連の本2冊^(注12)を翻訳し、ヨーロッパの製鉄技術をよく理解した。これらの本では、18～19世紀にかけてヨーロッパで広く用いられた反射炉鑄造法（パドル法）が紹介されていたが、この方法は大量生産向きではなかったもので、大島は釜石鉱山の鉄鉱石を原料にした洋式高炉法で均質な銑鉄を量産すべきだと説いた。帰藩後（1857）、大島は盛岡藩領の甲子村大橋（現・釜石市）に、たたら製鉄技術者の協力を得て日本初の洋式高炉を建設し、1858年〔安政5〕12月1日に初めて鉄鉱石から銑鉄を生産（連続出鉄）することに成功した。この功績を称え、12月1日は『鉄の記念日』になっている（日本鉄鋼連盟が1958年〔昭和33〕に制定）。

その後、1880年に官営の釜石製鉄所が建設されたが、種々の問題を抱え3



年後に廃止の憂き目を見ることになった。官営釜石製鉄所は、すべての設備を英国から輸入し、英国人技師の指導のもとで作られたが、考え方の相違により大島は計画段階で釜石を去っている。仮に成功していたとしても、歴史的には高く評価されなかった可能性が高い：この英国式製鉄所では、まず (i) 高炉で銑鉄をつくり、続いて (ii) 反射炉（パドル炉）で錬鉄を製造して、(iii) 錬鉄圧延製品をつくることを目指しており、錬鉄は鋳鉄よりも強靱でエッフェル塔などの建設を可能にしたが、鋼よりは弱く、生産効率も低いことから時代遅れの方法になりつつあったからだ。

たたら製鉄を改良した角炉 (注13)

西洋式製鉄技術の導入による鉄鋼の商業生産がなかなか安定した軌道に乗らない中、明治の中頃までは「たたら製鉄」も我が国の鉄鋼生産を担い続けた。しかし銑鉄や錬鉄が大量に輸入されるとコスト面で国産品は太刀打ちできず、砂鉄銑の優れた特質を生かして軍需に販路を求めた。明治の中頃以降は、それまでわが国の鉄鋼生産を担ってきたたたら製鉄業者の救済の意味もあって、たたら製鉄の弱点の改良が試みられ小花冬吉と黒田正暉らによって「角炉」が開発された。角炉では、(1) 炉の構造を耐火レンガ製にし、炉の寿命を延ばし、(2) 炉高を高くすることで、炉内の温度を上げ、連続操業を可能にし、(3) 送風の予熱炉を設け、水力を利用した送風によって、木炭の消費量を削減する工夫がなされた。従来なたたら製鉄に西洋式高炉の技術を

取り入れ大幅な生産性向上を図ったものといえる。明治末から昭和40年(1965)まで創業された。

明治政府の方針「富国の基本は鉄」と官営八幡製鉄所

幕末の黒船来航以降、海防が強く意識されるようになり大砲の鋳造や軍艦の製造のための製鉄所の建設機運が高まった。1871～1873年にかけて米国と欧州を見て回った岩倉具視視察団も社会を変革しつつある「鉄の力」に強烈な刺激を受けて帰国した。米国留学中だった手島精一（後の本学校長）も同使節団に臨時の通訳として同行し、英国の軍港を見て度肝を抜かれている。それまで輸入に頼っていた鉄鋼素材や鉄鋼製品を自国で生産できるようにしなければならないのは明らかだ。上記のようないくつかの試みを経て、海外技術を導入して官営八幡製鉄所を作ることになった。

どの国の技術を導入するかを決めるために、大島道太郎（大島高任の息子）を中心とする調査団が派遣され、米国・フランス・ベルギー・ドイツを回って実地調査し、ドイツ最大の製鉄所（ゲーテホフマンクスヒュッテ社、GHH）の設計に基づいて建設することになった。指導役のドイツ人技術者の八幡への招聘のみでなく、日本人技術者もドイツのGHH社で実地訓練を受け技術を学べるよう契約を結んだ。こうして八幡製鉄から派遣された第1次研修生の中に、第2章の主人公である東京職工学校（本学の前身）の第2期生 山崎久太郎と第5

期生 羽室庸之助が含まれていた。

2. 近代製鉄技術の概要

現在の製鉄法のまとめ

前章の歴史の部分でも、「鋼」がいかにつくられるようになったかについて要所要所で触れたが、本章の前置きとして、ここで再度、現在の製鉄法とその原理を簡単にまとめておきたい。

「鉄は国家なり」と言われるが、その「鉄」を制するのは意外にも「炭素」だ。炭素を含まない純粋な鉄は、私たちの先入観とは逆に、極めて軟らかく展延性に富むので日常生活では使い物にならない。炭素が少量含まれてはじめて、私たちが日ごろ接している「丈夫な鉄」（専門用語で『鋼』）になる。炭素含量が多すぎると「もろくて使えない鉄」になってしまうので、製鉄の歴史も『脱炭素』をいかに実現するかの戦いだったのだ。



製鉄所では、コークスを燃焼させ [式1]、高温下で鉄鉱石（ Fe_2O_3 ）を還元し [式2]、鉄分を溶かし出す。これが「銑鉄」だが、コークスを使っているために炭素含量が増える（約4.5%）。銑鉄の成分を微調整したものが「鋳鉄」（図④）で、炭素が多い分、融点が低く（約1200℃）、鋳型に流し込んで整形できることから鋳鉄と呼ばれる。溶けた鋳鉄には約4%の炭素が溶け込んでいるが、冷えて固まると炭素の溶解度は2.1%ま

表 1. 海外 製鉄練習生

氏名	発令日	専門	習得技術等
技監 大島道太郎*			
三好久太郎*	M30.3.3	化学	
江藤捨三*	M30.3.11	製鍊	
葛 蔵治*	M30.3.11	製鍊	
山崎久太郎*	M30.3.11	機械	圧延機
羽室庸之助*	M30.3.11	機械	ハマルチン式製鋼業
服部 漸*	M30.3.25	製鍊	
荻原時次	M30.7	機械	
宗像十郎	M30.7.28	製鍊	
佐久間方雄	M30.7.28	製鍊	
安藤厚三郎	M30.7.28	製鍊	留学中に病死

*1897 年〔明治 30〕5 月にドイツ入りした 7 名。

■ 東京職工学校（本学の前身）卒業生

で低下し、余分な炭素はセメントタイト (Fe_3C) となって析出するため、鋳鉄（白鉄）はもろく、たたくと割れてしまう。鋼のもろさの原因にはリン（P）や硫黄（S）などの不純物の存在もあるので、丈夫な鋼を作るためには、“脱炭素”とともにこれらの元素も除去しなければならない。従って、製鉄工程は次の 2 段階からなる。（1）製鉄工程：鉄鉱石を還元して鋳鉄にする工程と（2）製鋼工程：鋳鉄から炭素や不純物を取り除いてより純度の高い鋼に仕上げる工程（図⑤）。

3. 蔵前育ちの 3 人のサムライ

ドイツ技術の本格的導入

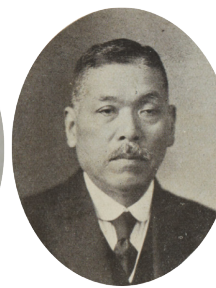
明治初期の日本は、必要な鋼材のほぼすべてを輸入に頼っていた。富国強兵のためには、自国での鉄（鋼）づくりが不可欠で、量産可能な近代的な製鉄所の建設が急務となっていた。日清戦争（1894～1895 年〔明治 27～28〕）で勝利した際の賠償金を財源の一部とすることにして、上述のようにドイツの GHH 社の技術を導入することになり、海外製鉄練習生 10 名（表 1）が選ばれ、官営八幡製鉄所からドイツの Oberhausen 市（図⑦）にある GHH 社に派遣された（1897 年 5 月）。



山崎 久太郎
(1864～1942)



羽室 庸之助
(1868～1944)



浅村 三郎
(1861～1936)



大山 義年
(1903～1977)

⑥ 製鉄技術の発展に貢献した本学関係者。山崎・羽室・浅村さんは平炉技術の先進性に目を付け、いち早く日本で稼働させることに成功した。羽室さんは後に衆議院議員を一期務めている（写真は選挙公報ポスターから；武藤山治全集第 5 巻）。浅村さんは日本初の特許事務所を開いたことでも知られる。大山さんは純粋酸素転炉の実用化のバリエーションとなっていた工業スケールでの酸素製造法を開発した。後に本学の学長を務めた（在任期間：1962.8～1966.8）。

その中には本学の前身校の卒業生 2 名（山崎久太郎 1864～1942 & 羽室庸之助 1868～1944）も含まれていた（表 1, 図⑥）。彼らの任務は、「製鉄用ロール技術の習得」だったが、現地で目にしたのは製鉄業が従来の『鋳鉄（鋳鉄）』から、『鋼』の時代へと一大変革を遂げつつある姿だった。従来の鋳鉄/鍛鉄製に比べて格段に強靱な鋼鉄製の鉄道レール・車軸、砲身、橋梁などが作られていたのだ。製鋼の要は「いかにして炭素濃度を 2.1% 以下にするか」だが、英国やドイツでは画期的な“平炉法”（図③ C, E）が実用化されていた。平炉法では燃料を用いて炉を高温にするが、その際

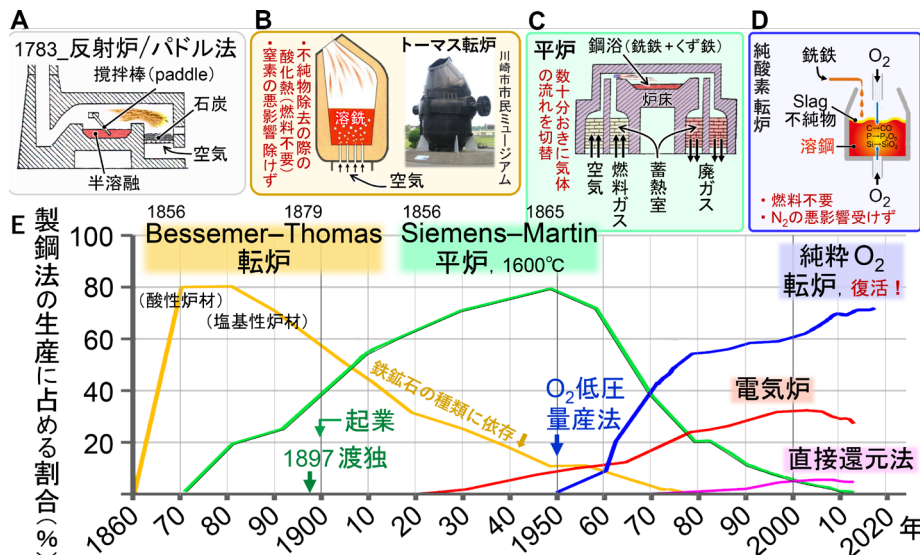
に廃ガスの熱を有効利用して蓄熱室の格子積みレンガを温め、数十分したところで気流の向きを変えることにより、予熱された空気と燃料ガスを燃焼させて炉をより高温にできるという優れた特徴を持っている。この蓄熱室切替法で約 1600℃が達成されていた。

日本初の平炉による製鋼

衝撃を受けた山崎・羽室の両名は、この技術こそ日本に持ち帰るべきだと決心し、社命の技術習得はそこそこに、もっぱら平炉法による製鋼技術の習得に専念することを誓い合って、隣町 Essen にあるクルップ社（Krupp, 図⑦）で研鑽を積んだ。その後の展開は、久太郎の孫の山崎 升 本学名誉教授によれば概ね次のようだ（注 14）：「2 年間、安下宿でじゃがいもを食べながら貯めた金で できるだけ の機械を買い集めて、帰国時の船に積み込み、彼ら自身は船室ではなく低料金のデッキパッセンジャーとして甲板で寝起きし、2 か月かけて日本に戻ったのである。帰国後 命に反して「製鋼」の研究をした事情を述べ、農商務大臣に引き続き製鋼の試験に従事したい旨嘆願したが入れられず、両名とも休職を命じられた。背水の陣を敷いた彼等を支援したのが蔵前時代の恩師平賀義美教授や同窓生の浅



⑦ 製鉄業で栄えたドイツの都市（オーバーハウゼンとエッセン）。炭鉱が近く、当初はライン川沿いの水車小屋を動力源にできた。



③ 製鋼法の変遷。(i) 製鉄工程：鉄鉱石とコークスの混合物に熱風を送り、コークスを燃焼させると鉄鉱石中の酸化鉄が還元され、鉄鉄となる。これに続く第2のプロセス、即ち鉄鉄から過剰な炭素や不純物を除く(ii) 製鋼工程の主要な方法を示す。(A) パドル法：半溶融状態でかき混ぜながら脱炭素処理を行う。石炭とは非接触ゆえ、石炭由来の不純物は混入せず。過剰の酸素で不純物を酸化除去。(B) ベッセマー/トーマス転炉法：溶融状態の鉄鉄 (initial stage of the conversion) に空気を吹き込み炭素や不純物〔ケイ素、イオウ、リン〕を酸化物にして除去。ベッセマー転炉では酸性炉材のためリンの除去が困難であった。一方、トーマス転炉では塩基性炉材が用いられリンの除去ができた。転炉法はケイ素や鉄の酸化熱が発生するために燃料が不要という利点があるが、炉材と鉄鉱石の種類には相性があること及び吹き込む空気中の窒素 N₂ による熱損失と N₂ の溶鋼中への溶け込みによる鋼の性質劣化により、徐々に平炉法に駆逐された。(C) 平炉法：パドル法に似ているが、炉の廃ガスをそのまま捨てずに、蓄熱室の格子積みレンガの隙間を通して熱を回収し、蓄熱室切替法によって、次サイクルの燃料ガスと空気を予熱する操作の繰り返しによって、1600℃以上の高温を得られるようにした点が大きな改良点。燃料は石炭をガス化した気体燃料。(D) 純酸素 O₂ 転炉法：旧式の転炉法の欠点を補うために、空気の代わりに高純度の酸素を高速ジェットとして炉内の溶鉄に吹き込み攪拌を誘起すると、急激な酸化反応が起き、炭素や不純物が除かれると共に酸化熱で高温が保たれる。燃料不要で30分程度の短時間で終了し、高品質の鋼が得られるので、液体酸素の安価な工業的生産が可能になったのを契機に急速に普及し、現在の標準法になっている。図DはFinal stage of the conversionのイラスト。参考文献：中沢護人、『ヨーロッパ鋼の世紀 --- 近代溶鋼技術の誕生と発展』、東洋経済新報社、昭和62年(1987)。グラフの出典：<https://en.wikipedia.org/wiki/Steelmaking>

村三郎(明治19年7月、機械工芸学科第1回卒業生)及び住友家の関係者だった。こうして「日本製鋼所」(日本製鋼所と同義、後の住友金属工業(株)、現日本製鉄(株))を起業し(1899, 図③C & E, 緑), スタートは職員8名と工員24名で、苦勞しながらも日本初の平炉を稼働させ、製鋼技術の近代化を成し遂げた。創設時の主要設備は小型シーメンス式平炉(3.5トン)1基とドーソン式ガス発生炉1基だった。

<余話>

日本初の特許事務所^(注15) 第1回卒業生が開所

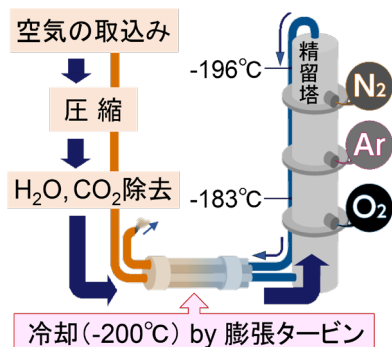
資金面・経営面で山崎・羽室らの起業を支援した浅村三郎⑥は、我が国最初の特許事務所(現弁理士法人 浅村特許事務所)創設者でもある。浅村さんは東京職工学校を卒業した翌1887年[明治20]に農商務省に設置されたばかりの専売特許局(現特許庁、初代局長：高橋是清[後の内閣総理大臣])に入所した。当時の日本では、“特許や知財”という概念はほとんど知られていなかったが、明

治政府が掲げた「殖産興業」政策の推進のためには、特許制度の充実が不可欠と考えた浅村さんは、高橋是清局長の誘いもあって、専売特許局で働くことにしたのだ。しかし当時の状況では特許出願の依頼などあろうはずもなく、開店休業状態だった。初代局長の高橋是清(1854～1936年[昭和11]、2.26事件で被暗殺、81歳)もこの状況を見かねたのだろう、「浅村君、申し訳ないが、特許事務所を立ち上げて、国民の側に立って、サービスをしながら、まず“特許”の必要性を広めてくれないか」と頼まれた。

「局長からの依頼とあれば何なりと」という時代のこと、浅村さんは専売特許局を辞めて個人の特許事務所を開設することにした。最初は東京でも軽く試行してみたが、需要を考えると商工業が盛んな街がいいということで、大阪を選んだ。こうして1891年[明治24年]に、大阪の北浜に我が国初の特許事務所『大阪特許代官社』(後の弁理士法人 浅村特許事務所)^(注15)が設立されたが、やはり最初は特許を作成するというよりは、啓発活動に明け暮れたそう。しかし産業の発展とともに、我が国でも特許に対する認識が次第に高まった。それにつれ本来業務が伸び始め、大阪だけでなく東京や他の地方都市にも拠点を展開するようになった。



⑥ 浅村三郎(右)と高橋是清(初代特許庁長官、撮影時は5度目の大蔵大臣)、於大蔵大臣執務室。写真提供：弁理士法人 浅村特許事務所。



⑩ 深冷分離法による液体酸素の工業生産。原料となる空気を取り込み、フィルターで不純物を除去した後に6気圧に圧縮後、水分や二酸化炭素を除去する（固まって氷やドライアイスとなると配管を傷つける）。続いて断熱下で、膨張タービン(Expansion turbine or Turbo expander)により圧縮膨張を繰り返すと空気の温度は下がり液化する。最終ステップの精留塔では沸点の差を利用して、酸素、アルゴン、窒素等を分取する。

4. 転炉法の復活に貢献した 本学 & 理研の工業的 酸素製造法

安価な酸素の深冷分離を 可能にした膨張タービン の開発

いきさつ

終戦直後の日本は貧困に苦しんでいた。すべての物資が不足し、燃料も無かった。そこで低品位炭を酸素濃度を高くして燃やせば良質の石炭と同じような燃焼効果が得られるだろうということで、当時の科学研究所（理研の前身）の仁科芳雄所長の指示で、当時本学教授と科学研究所を兼務していた大山義年⑥（1927 東京帝大，1940〔昭和15〕本学助教授〔化学工学〕，1942 教授，1962～66 学長）主任研究員らによる「酸素を多量に安く作る方法」の開発が始まった（昭和22年，1947）。

膨張タービンによって 低圧で 空気を液化 （注16）

日本での酸素液化プロジェクトが始まるしばらく前に、ロシアのピョートル・

ル・カピッツァ（1894～1984）が低圧縮状態で空気を液化することに成功したというニュースがもたらされていたが、終戦直後のことで文献等は入手できず独自に開発するしかなかった。そこで空気を数気圧に圧縮しただけで酸素を作る方法を考えることにした。空気を断熱膨張させると温度が下がる。これを効率よく行えるようにすれば、工業的スケールの酸素生産が可能になると期待したのだ。そこで膨張にタービンを使うことにし、その回転数を上げることに集中した。3年後にはパイロットプラントで、毎分4万回転を実現し、7年後の1954年〔昭和29〕には、八幡製鉄所に導入された（生産能力：約150トン/日）。当時の製鋼プロセスは平炉法が主流だったが、この純酸素を使う転炉法がまたたく間に主役となり（図③青線），時間のかかる平炉法は駆逐された。大山さんたちが開発した「膨張タービンを使う気体液化装置」（図⑩）は、日本の製鉄業のみならず化学工業や医療分野の発展に大きく貢献した。

5. 省エネ製鉄への挑戦

たたら技術で現代に蘇らせる マイクロ波製鉄 （注17）

たたら製鉄の特徴

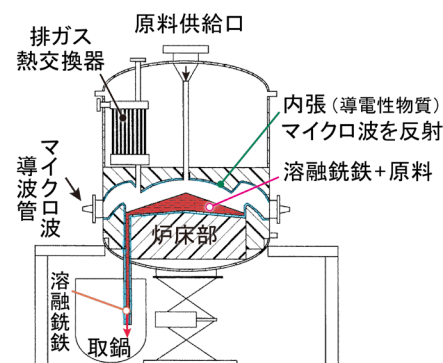
木炭を燃料及び還元剤として用いるのはこれまで見てきた方法と同じだが、微粉末状の砂鉄を原料とする点がユニークな特徴だ。砂鉄が飛散しないように弱い送風で高温を得る工夫がなされ、極めて短時間で銑鉄（ズク）が作られた（高速高純度製銑法）。それにづく大鍛冶で脱炭して鋼を得る過程は、ここでは検討対象にしない。

たたら製鉄の還元過程で閃いた マイクロ波製鉄

本学の永田和宏（1969 金属，1975 Dr，1992 教授，2009 名誉教授 & 藝大教授）グループの“たたら”との関わりは、1979年

（昭和54）8月に学生たちと共に 岐阜県関市の金子孫六 刀匠を訪ねたところから始まった（主目的は、大学祭での実演のための技術習得）。季節の関係で「刀剣の鍛錬」は休止中だったが、原料の「鋼」を作る過程を見せてもらうことができた。あまりの簡単さに驚くとともに、10月の『工大祭』で実演することにした。しかし、見るとやるでは大違いで、うまく行かなかった。失敗の原因を考え、工夫をしては工大祭のたびに試みるのだが、4年連続で失敗に終わり万策尽きた。そこで再び金子刀匠を訪ね、実験たたらを公開している大野兼正 刀匠を紹介してもらい、教えを乞うた。その結果、炎の色の微妙な変化や鞆（ふいご）の風の強さ、ノロ（溶融スラグ）を作ることなどが重要なポイントであることが分かり、ようやく再現実験に成功した（1983）。どこでも誰でも簡単に実施できるように工夫した方法は「永田式たたら」とよばれている。

その後、大学祭はもとより、小学・中学・高校での「出前たたら」や各地での「たたらサミット」などを通して、日本人が経験と勘で創り上げた“超絶技法”にスポットライトをあてるとともに、「永田式たたら」は2003年（平成15）からは本学の金属工学科の授業科目『金属工学創成実験』に組み込まれた。これらの活動により、永田さんは平成

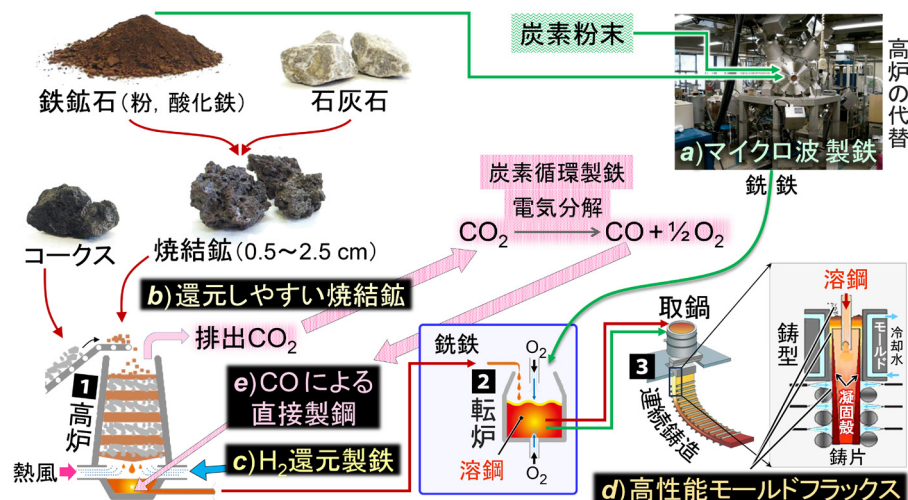


⑪ マイクロ波製鉄炉の構造。マイクロ波照射室の内面はマイクロ波を反射する銅又は銅合金等により構成されている。マイクロ波により加熱された原料中では、鉄鉱石が炭素源により還元されて溶融銑鉄が生成し、取出口から溶融銑鉄が流れ落ち、取鋼に溜まる。[WO2010087464A1](https://doi.org/10.26066/wo2010087464A1)

17 年度〔2005〕科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞（理解増進部門）を授与された。これまでのたたらの実演は 700 回をゆうに超えている。

たたら製鉄の原理を熱力学と鉄冶金学の観点から明らかにするために、出雲の「日刀保たたら」（木原明 [村下](#)）の見学及び計測機器を用いた分析やたたら古文書の研究者（高橋一郎、郷土史家）、さらには日本美術刀剣保存協会関係者（鈴木卓夫 たたら課長ら）との情報交換等を密に行った。たたら製鉄の高速高純度製鉄法の原理が科学的に説明できるようになるにつれ、現代技術との組み合わせで環境負荷が小さい（省エネ & CO₂ 排出削減型）新しい製鉄法ができないものかと考えるようになった。

出発物質としては砂鉄と同じような形態の粉末状鉄鉱石を用いることになるが、問題はこれをどのようにして加熱するかだった。そんな時に、たまたま卒業生から陶芸分野でマイクロ波を使っていると聞き、ひらめいたのが マイクロ波製鉄 だった（図 11、12 a）^{〔注 18〕}。これは電子レンジと同じ原理なので、原料の加熱と還元反応熱を高温ガスではなくマイクロ波照射で行うゆえ粉体は飛散しない。従って、焼結鉱や高炉（数千億円規模）は不要となる。また、原料である酸化鉄や炭素のみがマイクロ波を吸収して自己発熱し高速で昇温するため、たたら製鉄と同じ炉内状態が得られる。マイクロ波加熱は電気による発熱方法であるため、太陽光や風力など再生可能エネルギーで発電した電気を用いてマイクロ波製鉄を行えば、コークスを熱源とする現行製鉄法に比べ CO₂ 発生量を半減することができる。還元・浸炭溶融（鉄中の炭素含量を増加させて溶融する）に必要な炭素粉末も高価なコークスではなく、ごみや廃材などから調製できるというメリットもある。試作装置では好成績が得られており、大型で安価なマイクロ波発生装置の開発が待たれる。



12 現在及び近未来の製鉄工程 & 期待される東工大の貢献。現在の主要工程は、1 高炉 → 2 転炉 → 3 連続製造からなる。a) マイクロ波製鉄は高炉を不要とし、b) 還元しやすい焼結鉱の開発はコークスの使用量を減じ、c) H₂還元製鉄は CO ガスによる還元よりも高効率で環境負荷が小さく、d) 高性能モールドフラックスは連続製造工程を加速することができる。e) CO による直接製鋼は排出 CO₂ を再利用し、転炉処理を不要とする。

カーボンニュートラル・水素社会を目指した製鉄プロセスの研究

【1】旧金属工学科 鉄冶金学講座の流れをくむ人たちは、上記のような新しい製鉄法を模索するとともに、「地球にやさしく鉄を作ろう」を合言葉に、現行の製鉄プロセス（高炉と転炉の組合せ）の改善にも取り組んでいる。日本全体の CO₂ 排出量の約 14% が製鉄業（大部分は高炉）由来と見積もられているゆえ、ここでの努力は大きな成果につながる。【2】旧原子炉工学研究所（現ゼロカーボンエネルギー研究所、ZC 研）の加藤之貴教授（ゆきたか、化工 Dr 1991、2015 原子炉研教授、2022 ZC 研 所長）が 2010 年に提案した「炭素循環製鉄」は、再生可能エネルギーや次世代原子炉「高温ガス炉」（HTGR）の運転と組み合わせて CO₂ を循環利用する製鉄法で、鉄鋼業界の脱炭素化に向けた新たな技術として注目されている。以下では、これらの技術の詳細を辿ってみよう。

永田さんが定年退職した後の林 幸（はやし みゆき、1992 金属、1997 Dr、2004 助教授、2021 教授）研究室では、マイクロ波製鉄

のことも気かけながらも ^{〔注 19〕}、現行の製鉄プロセスの改善も、カーボンニュートラル製鉄のトランジション技術として重要であると考え、国家プロジェクト『環境調和型プロセス技術開発 COURSE50』の一環として、次のような高炉からの CO₂ の発生量を減らす取り組みを行っている ^{〔注 20〕}。(1) 還元しやすい焼結鉱 ^{〔注 6〕}の作製（図 12 b）：コークスは還元材・加熱源であるとともに、高温ガスの通り道となる隙間を確保するための構造材の役割も果たしている。このコークスの使用量を減らすためには焼結鉱の組織制御、すなわち多孔質かつ高強度の結晶相を含む焼結鉱の開発が欠かせない。(2) 水素還元製鉄（図 12 c）：従来の方法では、鉄鉱石中の酸素を取り除く還元材としてコークスを燃焼して得た CO ガスを用いているが、これを水素ガス H₂ に代えた水素還元製鉄の実現を目指している。水素の場合は分子が小さく、鉄鉱石中の微細穴を通して内部に浸透しやすいため還元速度が 5 倍近くにもなるというメリットもある。一方で、鉄鉱石の CO ガス還元は発熱反応であるのに対し、水素還元は吸熱反応であるため、高炉に水素を吹込むと炉内の 1000℃ 以下の低温度域が拡大し、Fe₂O₃ から

Fe_3O_4 への還元膨張による亀裂伝播により、焼結鉱還元粉化（還元により焼結鉱が粉々に砕けて、高炉が目詰まりする現象）が生じるという問題がある。現在、林さんたちは、高水素高炉において威力を発揮する焼結鉱を低品位の鉄鉱石から製造する方法を研究中だ。東北大学や企業との共同研究により、高被還元性と難還元粉化性をあわせ持つ焼結鉱には SFCA-III という結晶相が重要であることを世界に先駆けて見つけており、SFCA-III 結晶を有する焼結鉱の製造法の確立が待たれる。

また、未来のカーボンニュートラル製鉄法として全世界で期待されている 直接水素還元製鉄法（鉄鉱石と石灰石から製造した焼結鉱を高炉で還元し溶銑を得るのではなく、粉鉱石をペレット状に成型し焼き固めたものを水素還元し固体の鉄を得る方法）の原料となる鉄鉱石ペレットの高強度化（直接還元製鉄炉の大型化には原料の積載荷重に耐えうる強度を持つことが重要）にも取り組んでいる。さらに、鉄鋼スラグの再利用に関する研究も行っており、我が国の鉄鋼業の CO_2 排出量削減に貢献している。林さんは、鉄鋼上工程（鉄鉱石から鋼を製造するプロセス）分野で我が国初の女性教授だ。

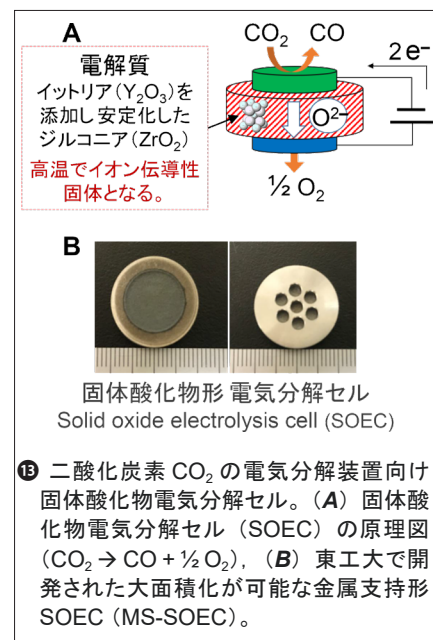
◆
須佐匡裕（すさ まさひろ、1980 金属、1982 MS、2002 教授、2019 物質理工学院長、2023 名誉教授）・小林 能直（よしなお、1993 東大 金属、1998 Dr、2008 本学准教授、2015 原子炉研教授、2022 ZC 研 副所長）グループは、(1) 製鉄工程の律速段階となっている連続铸造工程（図 12 d）の高速化に威力を発揮する モールドフラックスを開発した（注 21）。さらに、(2) リサイクル製鉄技術：社会で役割を終えた鉄鋼製品の 80% 以上はスクラップとして回収され、再利用される。この場合は電気炉で溶融・精錬すれば済むので、 CO_2 を多量に排出する高炉工程は不要となり、 CO_2 の排出量は 1/4 に削減できる。気になるのは鉄鉱石を原料とした「鋼」の生産と鉄スクラップから再生した「鋼」の生産量の比率だが、中国を除くとほぼ 1:1 に近づいているのだそうだ。素晴らしいリサイクル率だが、問題はあ

スクラップに含まれる分離困難な不純物、特に銅 Cu が表面赤熱脆性の原因になるのだ。この弱点の抑制法を開発し、リサイクル製鉄法の向上に貢献した。(3) 月面製鉄の可能性も検討中：須佐・小林グループは「宇宙資源のその場利用」というコンセプトの下で、約 8% の FeO を含む月土壌（模擬砂）を太陽熱等を利用して黒鉛で還元すると、鉄が得られることを示している（注 22）。重い鉄鋼をロケットで運ぶことなく、人類が宇宙に進出していけそうな夢のある研究だ。学生も飛びつくに違いない。

カーボンニュートラルに向け、 本学が新しい炭素循環 製鉄を提唱（注 23）

CO_2 の電気分解を用いた カーボンリサイクル製鉄

本学のゼロカーボンエネルギー研究所（ZC 研、旧原子炉研）の加藤之貴所長・高須大輝（ひろき、2018 原子核工学 Dr、2022 本学准教授）グループによって開発が進められている「炭素循環製鉄」（iACRES, Smart Ironmaking based on Active Carbon Recycling Energy System）（注 23）は、製鉄プロセスから排出される CO_2 の再資源化技術として、 CO_2 を電気分解することにより一酸化炭素（CO）へと還元し（ $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 1/2 \text{O}_2$ 、図 12 中央）、生成する CO によって鉄鉱石を還元し直接「鋼」を得る（図 12 e）。 CO_2 の CO への還元には高温での電気分解が効率的で、固体酸化物電気分解セル（SOEC、図 13）（注 24）の利用が検討されている。電気分解セルの駆動には、再生可能エネルギー、原子力エネルギーを利用する。後者としては高温ガス型原子炉（HTGR）からの 950℃ の熱エネルギー（キャリアは冷却剤としてのヘリウムガス）と電力の併用が効率的だ。本プロセスは水素還元製鉄より熱力学的に効率が高く、また水素の併給も可能であり MIDREX® を含む直接還元製鉄分野のカーボンニュートラル化に貢献する革新的な技術として注目されている。



これら本学で進行中の試みが近い将来に実を結び、エネルギー・環境問題の緩和につながって欲しいものだ。2022 年に ZC 研究所に本部を置く形で文部科学省事業「グリーントランスフォーメーション・イニシアティブ」(Tokyo Tech GXI) が開始された。本事業に伴い大岡山地区実験棟を全面改修して 2023 年度に竣工した「炭素循環産業システム実証研究拠点」(GXI 大岡山ラボ) が飛躍台になってくれることを期待しよう。

(注 1) 永田和宏（本学名誉教授）、井澤英二（九大名誉教授）、岩井秀人（逗子開成中高教諭）、渡邊 玄（たかし、1998 金属、2003 物質科学 Dr、本学物質理工学院）、中西哲也（九大総合研究博物館 准教授）、「古代銅製錬から鉄製錬への展開の実験的検証」、金属、Vol. 93, No. 10, 847-856, 2023。◆永田和宏、渡邊 玄、岩井秀人、井澤英二、松井良行、「古代製銅炉内の酸素分圧 --- 製銅から製鉄への発展」、一般社団法人日本鉄鋼協会 第 183 回春季講演大会、材料とプロセス、第 183 回春季講演大会概要集、Vol. 35, 179, Mar. 2022。

(注 2) 古代銅製錬では、硫化銅鉱石（鉄を含む CuFeS_2 ）は全て焙煎して酸化物にして使った。黄銅鉱中の鉄の大部分はスラグとして除去される。この方法は鉄の硫化物が銅の硫化物よりも酸化されやすい性質を利用しており（ $4\text{CuFeS}_2 + 9\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cu}_2\text{S} + 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{SO}_2$ ）、銅よりも先に鉄がケイ砂（ SiO_2 ）と反

応してケイ酸スラグを形成し、低比重のケイ酸スラグが溶融原料上に浮上してくることで酸化鉄が分離される。

(注3) 永田和宏,『人はどのように鉄を作ってきたか—4000年の歴史と製鉄の原理』, pp. 37—38, 講談社, 2017. ◆酒井達雄, シリーズ「鉄の利用: 人類の遙かなる営み(1~7)」, 立命館大学機友会ニュースデジタル版, 2018~2020. ◆大村幸弘,『鉄を生みだした帝国—ヒッタイト発掘』, NHK ブックス 391, 1981.

(注4) NHK スペシャル『アイアンロード—知られざる古代文明の道—』, 2020年1月13日放送。

(注5) 現在では, 石油蒸留残渣 (コールター様のピッチ) を蒸し焼きにして製造するピッチコークスもあり, 石炭コークスよりも燃焼カロリーが高い。【参考】14世紀頃, 「木炭高炉」が登場し, 鉄の増産に拍車がかかるとイギリスでは森林資源が枯渇しはじめ, 大きな社会問題となった。森林枯渇問題の解消のために「石炭高炉」が試みられたが, 石炭にはイオウ分が多いため石炭を使って作った銑鉄にはイオウが多く含まれ使い物にならなかった。そこで開発されたのが「コークス高炉」で比較的良質の銑鉄が得られるようになり, 銑鉄中の炭素をバドル法(図8A)で燃やすことによって減少させ錬鉄を得る方法へと発展した。稲角忠弘 日本工学会フェロー (元新日鐵) の推測によれば, 中国では良質の石炭 (無煙炭, イオウや揮発分が少ない) を用いたために西洋に先駆けて鉄の製錬技術を高度化できたようだ [須佐名誉教授経由の私信]。

(注6) 厳密には焼結鉱 (図11左上)。粉状の鉄鉱石をそのまま炉に投入すると高炉が目詰まりして熱風の通りが悪くなってしまうので, 石灰石と鉄鉱石を混ぜて焼結鉱 (0.5~2.5 cm) にしてから炉に入れる; 他にペレットにする方法や鉱石塊を使う方法もある。

(注7) 小嶋浩毅, 古代の製鉄, *note*, <https://note.com/himiko239ru/n/ndc21de-ccc78f>

(注8) 直接製鉄法では, 炉が高温にならず鋼が完全に溶融しない。固液共存の半溶融の状態では金属鉄になるために, 炭素濃度が銑鉄に比べ低い鋼塊が得られる。できた鋼塊には, 鉄とスラグが混在しているので, これを熱間鍛造によって, スラグを除去す

る。これを錬鉄 (炭素含量が低い) という。錬鉄を炭で焼いて浸炭することで, 鋼を得ていたとされている。たたら製鉄は銑鉄と鋼塊を同時に製造したが, 鋼塊は硬く, 割ることができなかった。可能となったのは江戸中期からだ。それまでは鋼塊は破棄されていた。現在でも島根県 金屋子神社に奉納されている。

(注9) 愛媛大学東アジア古代鉄文化研究センター (現アジア古代産業考古学研究センター), 「たたら製鉄の歴史と技術」, 第1回鉄文化シンポジウム記録集, 2009. [simpo03.pdf\(chime-u.ac.jp\)](https://simpo03.pdf(chime-u.ac.jp))

(注10) 東京工業大学製鉄史研究会,『古代日本の鉄と社会』, 平凡社 (平凡社選書 78), 1982. ◆八千代町教育委員会, 八千代町埋蔵文化財調査報告書2『尾崎前山』--- 茨城県結城郡八千代町尾崎前山 ---, 1981年 [昭和56] 3月。

(注11) ジャパン九州ツーリストのブログ, 「鉄鋼の産業発展物語」。

(注12) ヒューゲニン (U. Huguenin) 著『ロイク王立鉄製大砲製造所における鑄造法』&『西洋鉄鋼鑄造篇』。大砲製造の指南書で, その大砲製造に銑鉄の良否が大きく影響するので, 銑鉄を溶解する反射炉と銑鉄製造の高炉が詳細に付記されている。これらの本では, 17~18世紀にかけてヨーロッパで広く用いられた鑄造法 (反射炉を用いるバドル法, 図8A) が紹介されているが, バドル法では1回の操作に10時間以上もかかり, 得られる錬鉄も少ないため大量生産には適していなかった。

(注13) 雀部実, 館充, 寺島慶一, 穴澤義功, 尾上卓生, 片山裕之, 河瀬正利, 清水欣吾, 佐々木清文, 永田和宏, 藤尾慎一郎, 村上英之助編,『近世たたら製鉄の歴史』, 第5章, 永田和宏, 「第5章: 近世たたら製鉄法の改良と評価」, 丸善プラネット, 2003。

(注14) 山崎 升, 「明治・3人の蔵前OB——最初の民間平炉・日本鑄鋼所の創設」, 東工大クロニクル No. 357, July 2001. ◆授業「東工大のキャンパスに親しむ」のレポートで, 蔵前編として紹介した学生がいた。

(注15) 彩の国企業探訪「特許業務法人 浅村特許事務所」, ぶぎんレポート No. 225, 44--47, 2018年10月号。 <https://www.bugin-eri.co.jp/report/report03/file/181001cs.pdf> ◆郡正一, 「浅村三郎」, 蔵前校友誌, 明治の部, p. 21, 大正15年 [1926] 9月。◆浅村特許

事務所の沿革: <https://www.asamura.jp/history/>

(注16) 大山義年, 「酸素の多量生産法」, 理化学研究所の動き, 放送講演集, 理研の仕事シリーズ No. 2, pp. 36-39, 1960。

(注17) 永田和宏,『たたら製鉄の技術論—日本古来の鉄作りが現代によりみえる』, アグネ技術センター, 2021. ◆第二次大戦後, 刀剣の製造が禁止されて, たたら製鉄は行われなくなったが, 1977年 [昭和52] に, 島根県仁多郡 (現 奥出雲町) 横田町に「日刀保たたら」として復元され, 現在, 毎冬3回操業されている。◆永田和宏,『日本の鍛冶の技術論』, アグネ技術センター, 2023。

(注18) 永田和宏, 林 幸『製鉄を変革するマイクロ波技術』, 電気学会誌 132, 20—22, 2012. ◆特許: 永田和宏, 林 幸, 佐藤元泰, 高山定次, 櫻村京一郎, 「堅型マイクロ波錬鉄炉」. 特許・公開. 国立大学法人東京工業大学, 大学共同利用機関法人自然科学研究機構. 2010/01/31. 特願 2010-548579. 2012/08/02. 特開 (再表) 2010/087464. 2012. WO2010087464A1 (図11)。

(注19) マイクロ波錬鉄研究を継続せず, 現行の製鉄プロセスの改善, すなわち高水素高炉や直接還元製鉄の基盤研究に舵を切った理由: マイクロ波錬鉄炉は再生可能エネルギーにより発電した電気を直接熱に変換できる素晴らしい方法だが, 現行の耐火物では高温でマイクロ波を吸収するようになり, 過熱で損傷するという問題及び物質のマイクロ波吸収率には温度依存性があり温度制御が困難であるという問題があり, 実用化には時間がかかると思われたからのようだ。

(注20) Hayashi, M., Sukenaga, S., Ohno, K., Ueda, S., Sunahara, K., and Saito, N.: Agenda for low reducing agent operation of blast furnace: Thermophysical properties of molten slags on the gas permeability at the dripping zone of blast furnace. *Tetsu-to-Hagene*, 100(2), 211—226, 2014. ◆ Matsumura, M., Takayama, T., Hara, K., Yamaguchi, Y., Ishiyama, O., Higuchi, K., Nomura, S., Murakami, T., Hayashi, M., & Ohno, K.: Improvement of sinter strength and reducibility through promotion of magnetite ore oxidation by use of separate granulating method. *Tetsu-to-Hagene*, 103(6), 388—396, 2017. 【2018年俳論文賞】

(注21) 豊田弘啓, 久志本惇史, 遠藤 (小嶋) 理恵, 小林能直, 林 幸, 須佐匡裕, 「放射伝熱を劇的に低減させるモールドフラックスの提案」, 材料とプロセス, 第157回春季講演大会概要集 Vol. 22, No. 1, p. 123, 2009.

(注22) Kobayashi, Y., Sonezaki, H., Endo, R., Susa, M. Reduction kinetics of iron oxides in molten lunar soil simulant by graphite. *ISIJ International*, The Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 50, No. 1, pp. 35-43, Jan. 2010.

(注23) Kato, Y. “Carbon recycling for reduction of carbon dioxide emission from iron-making process”, *ISIJ Int.*, 50, 181-185, 2010. ◆加藤之貴, 宇治澤 優 (住友金属工業): 製鉄方法, 出願番号: 特願 2010-006238 (出願日 2010.1.14) ◆ Kato, Y., Ujisawa, Y., Sakai, H., Inada, T. “Application of carbon recycling iron-making system in a shaft furnace”, *ISIJ Int.*, 55, 359-364, 2015.

(注24) Takasu, H., Maruyama, Y., Kato, Y. “Development of metal supported SOEC for carbon recycling iron making system”, *ISIJ Int.*, 60, 2870-2875, 2020, The Diamond Jubilee Issue, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-506>

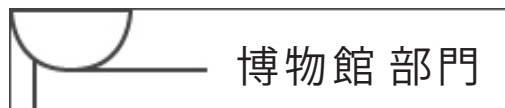
謝 辞

永田和宏名誉教授, 須佐匡裕特命教授, 林幸教授, 及び加藤之貴教授に目を通していただき, 専門的な立場から加筆・アドバイスをいただいた。

文: 広瀬茂久

2023 年 11 月

東京工業大学 博物館 資史料館部門
centshiryou@jim.titech.ac.jp



博物館 部門

東京工業大学 博物館



資史料館 部門

152-8550 東京都 目黒区 大岡山 2-12-1-E3-12 03-5734-3340 centshiryou@jim.titech.ac.jp
<http://www.cent.titech.ac.jp/>

佐藤 勲 (館長, 総括理事・副学長)
山崎鯛介 (教授, 副館長, 博物館部門長)
広瀬茂久 (特命教授, 資史料館部門長)
小林隆夫 (特任教授, 資史料館部門)
奥山信一 (教授, 兼任)
金子寛彦 (教授, 兼任)
野原佳代子 (教授, 兼任)
大竹尚登 (教授, 兼任)

服部佐智子 (研究員)
山中章江 (研究員)
浅井善朗 (事務職員)
佐々木裕子 (事務限定職員, 学芸員)
城平美侑 (事務支援員, 学芸員)
下角彰子 (事務支援員)
渡辺菊乃 (事務支援員, 資史料館)
鎌田祐輔 (事務支援員, 資史料館)

本間英子 (事務支援員, 資史料館)
和田康義 (事務支援員, 資史料館)
竹内 龍太郎 (事務支援員, 資史料館)
広報課 (博物館担当)
牧野崇行 (課長)
池谷大輔 (広報推進グループ長)
尾崎有美 (広報戦略グループ長)
資史料館: 045-924-5501