

金属を通して歴史を観る

3. 金属生産量の歴史(2) 銅

新井 宏

日本金属工業(株) 常務取締役

前回すでに、鉄のみでなく、銅や金銀の歴史的な生産量推移について、あらかじめ表3に「各時代の各種金属の生産量」としてまとめておいた。個々の数値についてはそちらを参照していただくとして、今回は銅生産量の推定根拠等について述べる。

〔ヨーロッパ〕鉱山国だったドイツ

ローマ時代の銅生産については、まだ参考とし得る資料に巡り合えないでいる。当然「銅の島」の意を持つ「キプロス」の銅が対象になろうが、その考古学的な研究状況について紹介している原善一郎氏も、量については何も触れていない。藤野明氏が『銅の文化史』で紹介しているように、ギリシャ人オフリニウス(1世紀頃)の挙げた七不思議に、ロードス島のブロンズ製ヘリオス像(前四世紀)の高さが32メートルもあったとか、ナイル河口のファロス島の灯台に巨大な反射鏡があったとか、豊富な銅を思わせる伝承もあるが、ローマ自身は銅や錫に恵まれず、交易等によって入手していた。ロシア人のミカエル氏が『金属博物館紀要』に紹介するところによると、ローマ時代以前のキプロスの銅の年産量は10～20トンであったと言う。それとは別にヨルダンの2つの銅製錬遺跡でも、残留スラグの量からみて、通算5000～10000トンの銅が生産されたとの報告もある。数百年間にわたるものと思われるので、こ

こも年産20トン程度であろうか。このような銅製錬基地がいくつあったか判らないが、ローマ帝国内では数百トン規模にはなるかも知れない。600トンと仮置きしておくが、何か新しい資料を見つけたら、後日補いたい。

ヨーロッパ中世の銅生産量については、まずベックの『鉄の歴史』を参照したい。そこには極く断片的なことしか述べられていないが、ドイツの鉱業は12世紀には開花しており、当時のチロルの銀山および銅山には、3万人の鉱夫が働いていたと言う。享保2年(1717)の秋田阿仁銅山の例では人口2640人で160万斤(1000トン弱)の銅を生産しており、3万人が家族を含めた値としても、それが確かなら大変な生産水準である。

しかしより信頼できる資料としては、フッガー家の記録がある。諸田実氏の『フッガー家の時代』によれば、16世紀初めの当時のヨーロッパにおいて、フッガー家が銅の取引きを取仕切っていたのは間違いない。そのフッガー家が銅の供給のために開発したのが、ハンガリーの鉱山である。記録によれば、1497年から1539年の間、ハンガリーから送られた銅は年平均300万アントウェルペンポンド(約1500トン)であった。鉱山国のドイツのことであるから、その他にもかなりの銅生産があったはずで、全体としては3000トン程度としておきたい。16世紀中ほど

には、ドイツで硫化銅鉱を酸化製銅する近代銅製錬法がアグリコラにより発明されたという。

なお後にも述べるが、ヨーロッパでは1550～1600年頃、米大陸からの膨大な銀の流入により、物価が3～6倍に高騰した。その中であって、竹岡敬温氏の「16世紀リヨンの貨幣と物価」『大阪経済学』23によると、鉄は一般物価と同じように上昇したのに銅価はまったく変化しなかったと言う。この頃ヨーロッパでは銅生産が銀生産の伸びに匹敵するほど活発化していたものと思われる。

一方、英国は伝統的に錫の生産国ではあったが、17世紀末まで銅の生産は重要ではなかった。諸統計から見ると、18世紀初めの生産量は1500トン程度で、18世紀の後半になると3000トン近くになる。これが19世紀の中葉には13000トンに急増する。19世紀中葉、ドイツは45000トンのレベルに達しており、ほぼ英国の3倍の水準であり、類推するに18世紀初までのドイツの銅生産量は5000トン程度であったであろう。これなら先に推定した16世紀の値とも整合性が取れる。後述のように、17世紀末から18世紀初、日本の銅生産が世界一の「定説」があるが、ドイツとはほぼ同等のレベルにあったのではなかろうか。

〔中国〕古代としては桁外れの銅消費

しばしば日本でも催されている中国古代の青銅器展でもわかるように、中国では圧倒的に豊富な青銅器鋳物類が発掘されている。しかし中国で青銅器文化が始まったのは、現在確かめられている限り河南省王城岡のB.C.2450頃であり、人類が初めて銅を手にした太古ペルシャのB.C.5500頃と比較しては明らかにのこと、南メソポタミヤのシュメール人がB.C.3500頃ブロンズを知ったのに比べてもかなり遅れている。

中国において、銅生産量を示唆する資料があらわれるのは、前漢時代からである。戦国期から漢代の鉱山として知られる湖北省の銅緑山には、朱寿康氏の『金属博物館紀要』の論文によれば、銅の鉱滓が40万トン以上も残っており、ここでの産銅だけでも10万トンはあったであろうと言う。鉱石には、マラカイト(炭酸銅)や酸化銅が主として用いられ、木炭

を燃料とした送風炉で溶解されていた。鉄分が5%も入っているものがあり、酸化精錬はおこなわれていなかったと思われる。なお鉱山遺跡の状況については、雷従雲氏の論文「中国湖北省銅緑山古坑道冶金遺跡と春秋戦国時代の採鉱冶金」が『考古学雑誌』68-3に紹介されている。

銅緑山の近くにある戦国期の一諸侯に過ぎない曾侯乙の墓から、編鐘をはじめとする青銅器が約10.5トンも出てきて驚いたことがあるが、銅緑山の規模を知れば当然とも言える。ただ、その量の多さには、日本における弥生時代・古墳時代を通して発掘された青銅器の総量が10トンに満たないことと比較して驚いて欲しいのである。このことは後で改めて触れるであろう。

中国の銅生産量をもうすこし直接的に推定する方法としては、鑄銭の問題がある。中国では歴代貨幣の中心が銅貨であり、銅生産のかかなりの部分が鑄銭に用いられていた。『漢書』によれば、孝武元狩5年(B.C.120)から平帝元始(A.D.1)までの120年間に発行された五銖銭が280億萬余とあり、この重量が約10万トンで、年当たりでは約1000トンである。面白いことに現在使用されている十円玉の発行総数も50年間で280億枚である。漢代の人口は、現在の日本の人口の半分くらいであるから、どの程度の銭の普及度であったか、自ずと想像できるだろう。

しかし、中国における銅産は後漢以降いちじるしく停滞する。これは後漢初に人口が3分の1にまで低下したと無関係でない。その後、後漢の末には人口がいったん回復するが、三国時代に入って再び最盛期の10分の1まで人口が減る。中国の銅鏡の状況を見ても、六朝の後半の5、6世紀には、鏡の製作が急に落ち込み、この時代の古墳から出土する鏡は貧弱な小鏡か鉄鏡になり、銅銭の品質も悪くなる。この時期が日本の古墳時代に当る。日本においても、弥生時代より古墳時代の方が銅消費量が少なくなることについては、後で「発掘された金属量」のところでふれる。

唐代に入ると再び人口も回復し、すべての面で生産活動が活発化する。開元通宝が主銭貨になるが、宮沢知之氏の『宋代中国の国家と経済』などの考証によると、その発行総数は400～600億枚であり、

16万トンから24万トンに相当する。年当たりになると、1000トン弱である。したがって、漢代や唐代の中国では毎年平均、鑄銭に1000トン弱の銅が用いられたわけで、その他鑄銭以外の用途を合わせると、毎年2000トン程度の生産であったと見たい。ただし、唐代の後半はまた生産が停滞する。前出の朱寿康氏は、唐代後半の9世紀末の生産量を130～350トンと低目に推定している。根拠は明らかにされていないが、推定値としてはすこし少なすぎるように思う。

その後鑄銭は、貨幣経済の発達がいちじるしい北宋代に入るとまたまた活発になり、約150年間に発行された総数は2600億枚で百万トンにも達する。年当たりによれば約6000トンである。一方、北宋代の銅生産は、そのほとんどすべてが官営でおこなわれており、その記録を平均的に見ると年1000万斤すなわち6000トンである。この結果を素直に理解すれば、産銅のほとんどすべてが鑄銭に使用されたことになってしまうが、実際には銭や銅製品は相互に改鑄されて使用されており、生産量としては、年6000トンで良いのであろう。北宋代に銅生産が急増したのは、膽銅という化学的な銅精錬法がこのころ開発されたことも一役買っている。崇寧5年(106)には約15%がこの膽銅による生産であった。

明代、清代の銅生産量についても興味があるが、簡単に入手できる資料がない。近世以降については、推定に推定を重ねて、確度を落とすのも本意でないので、後日を期したい。

〔日本〕銅貧乏から世界一へ

江戸時代の中期、日本が世界最大の銅生産国であり、毎年数千トンの銅を中国やヨーロッパに輸出していたということは、よく知られていることである。たとえば、1697年には公式輸出のみで896万斤(5400トン)あり、1665年には2700万枚の銅銭(100トン)さえ輸出していた実績がある。アダムスミスの『国富論』にも、日本の銅の話がしばしば登場するほどである。したがって、古来日本では銅生産が活発であったと思われ勝ちで、事実そのような主張を多く見かけるが、実際には室町時代の中頃までは、

銅生産には見るべきものがなく、かえって宋銭を大量に輸入して使用した歴史を持っている。

それでは、なぜ東大寺の大仏ができたのかと反問を受けるであろう。『東大寺造立供養記』によれば、大仏を造るのに使用した銅が739560斤(444トン)、錫が12618斤(8トン)である。まさに「国の銅を尽して尊像を鑄る」ため、全国の銅を集めた大事業であった。その大変さは、その後の銅生産の実績を見るとよく判る。

927年撰上の『延喜式』主税上には、備中・長門・豊前の三国からの鑄銭用の採銅貢進を年5833斤(3.5トン)、鉛2917斤(1.75トン)と定めている。驚くほど少ない量である。しかしこれが間違いでないのは、『類聚三代格』にも弘仁9年(818)から承和元年(834)の17年間の鑄銭の実績を2017万枚(約60トン)と伝えており、年当たりによれば3.5トンで、延喜式の水準と合っている。もっとも承和8年(841)に出された太政官符では、承和元年から毎年1100万枚(46トン)の鑄銭を、なんとか古銭で補いながら実施してきたが、ついに銅の入手難から年間350万枚(約15トン)に定額を下げたとも伝えられている。総合して考えると、銅の総生産高は奈良時代の年50トン程度から年々低下し、平安時代には20トン程度になってしまったのではなかろうか。

後ほどまた述べるが、平安時代末期から鎌倉時代にかけて銅価がいちじるしく高騰している。それは銅の生産の停滞の反映であろう。事実、神崎勝氏の「梵鐘の鑄造遺跡とその変遷」『日本鉱業史研究』33によれば、文献的にも遺跡の面でも、10世紀後半から12世紀の間、梵鐘の鑄造が途絶えていたと言う。その頃、史料に見える唯一の銅産地は、摂津の能勢郡だけであり、建長4年(1252)の鎌倉の大仏(124トン)も、輸入した宋銭を鑄潰したものであり、嘉禎元年(1235)鎌倉で洪鐘を鑄造したのも、銭330貫を鎔かしたものであった。平安時代以降、金銅仏が廃れ、木彫が盛行したのも、このような背景のもとで理解すべきであろう。建久元年(1195)の東大寺大仏の修理に83950斤(50トン)の銅を費やしているが、状況を考えると、これがすべて国産銅であったか疑問である。

酸化銅か硫化銅か、酸化製錬か還元製錬か

ここで、平安時代以降、銅の生産がいちじるしく停滞した原因について触れておきたい。一般論的には、このことは簡単に説明できる。銅鉱石には、酸化銅鉱と硫化銅鉱があり、技術的に簡単に銅を取出せるのは、酸化銅鉱系すなわちマラカイト(孔雀石、 $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$)や赤銅鉱(Cu_2O)などである。これらであれば、炭火で強熱するだけで、銅を得ることができる。しかし、これらの酸化銅鉱系は、地上にわずか1%程度しか存在せず、その他の99%は硫化銅鉱系すなわち黄銅鉱(CuFeS_2)や黄鉄鉱($\text{FeS}_2 + \text{Cu}$ 置換)などで、酸化脱硫と還元の2段階処理を要し、より発達した技術を必要としている。そのため、古代の技術では酸化銅鉱系を使い切ってしまうと、産銅が停滞せざるを得なくなったと説明すれば、一般論的には済む。

たしかに一般論はそのとおりであるが、ここに東大寺の大仏の銅が硫化銅鉱から製錬されたものだとする主張がある。それを初めて知ったのは、東京新聞(平成3年5月5日)で関西大学の亀井清教授が解説しているのを見た時であるが、私は非常に疑問に思った。それは、大仏の銅が長門の長登銅山から供給されたもので、その長登銅山は接触交代鉱床が至るところに胚胎しており、マラカイト(炭酸銅)が出ているからである。亀井教授が何を根拠とされたのか知らないが、その後関連する文献に当たってみると、葉賀七三男氏が『金属』に「冶金考古学のすすめ」を連載した中で、長登銅山の「からみ」に、硫黄が0.3%台も含まれており、硫化銅鉱の使用を結論づけていることを知った。また、製鉄技術の考古学で知られる佐々木稔氏も、長登銅山の銅滓に硫黄が22.73%、鉄が9.97%入っていることから、硫化銅鉱使用を前提として、遺跡からも硫化銅鉱を焙焼処理するための焼窯跡が見つかったと主張している。これだけ根拠があれば門外漢が何をか言わんやであるが、それでもなお発言してみたいことがある。それなら、なぜ平安時代以降、銅の生産が停滞したのかと。それが理系の視点である。そして調べてみた。

長登銅山について、数次にわたり紹介や解説をしている池田善文氏の最新稿『季刊考古学』62 によって、要点を抜書きして見る。

① 製錬跡からは、酸化銅鉱石の残片と緑青粒(マラカイト?)が見つかったが、未だ黄銅鉱などの硫化銅鉱を確認していない。

② 現在までに明確な焼窯はないが、用途不明の焼土坑が2基検出されていて、鉱石焙焼用の可能性が指摘できるが、遺構が簡単なだけに確認はない。

③ 製錬炉の炉型を円筒型堅炉と想定している。

この報告から見る限り、硫化銅鉱の使用はむしろ未だ確認されていない状況にある。そこで、さらに調べてみた。そして、長登銅山跡から見つかった粗銅の分析値に硫黄が約1%含まれているものの、鉄も6.45%、砒素も9.68%と異常に高いこと、長登の銅が使われた皇朝十二銭が総じて鉄、砒素が非常に高いことを知った。これが何を意味するか自明なことのように思う。十分な酸化精錬がおこなわれていなかったのである。

そもそも硫化銅鉱から銅を取り出すのが難しいのは、硫黄の存在のためではないと思う。それはむしろ銅鉱石中に多量に存在する鉄との闘いだったのではないか。たとえば、硫化銅であっても輝銅鉱(Cu_2S)のように鉄をあまり含まぬ鉱石なら、焙焼のような方法でいったん酸化してしまえば、後は酸化銅鉱の製錬と何ら変わらない。おそらく焙焼を経なくとも、単に酸化銅鉱の製錬と同じ方法で、多少雰囲気を整えるだけでも、銅を取り出せたはずである。

ここで近世におこなわれていた硫化銅鉱の製錬方法を簡単に見ておこう。

選鉱された硫化銅は、まず薪火の上で焙焼により硫黄を亜硫酸ガスとしてとばす。焼くのに10日以上、冷却にも同じ期間を要する。その後、素吹床という炉に移して、炭火によりやや還元性雰囲気で加熱すると、上から、からみ(スラグ、 $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ など)、 Cu-Fe-S の混合融体の銅滓、そして炉床に粗銅(炉尻銅)が溜まる。この工程を素吹きと言う。次にここで得た銅滓を真吹床にかけ、珪石を加え木炭熱で溶かしながら、ふいごにより強風を送り酸化製錬をする。これを真吹きと言う。ここまでの粗銅製錬の

工程であるが、さらに熟銅を得るための精錬プロセスとして、不純物の酸化除去工程である間吹きがある。

以上が通常説明されている製銅法である。このような工程を採っていることは、『鼓銅図録』にも出ているので間違いないが、なぜ焙焼をおこなったのかがよく分らない。どうせ最後に酸化製錬をおこなうなら、手間をかけて不完全な脱硫をおこなってもあまり意味がないのではないか。事実、江戸時代の越前の面谷銅山では、焙焼工程を経ず製錬をおこなっていたのである。すなわち、焙焼工程は硫化銅鉱の製錬の本質ではなく、素吹きでは木炭を使用するのに、安価な薪で済むという経済性にあったのである。そうであれば、硫化銅鉱の製錬のポイントは、真吹きの酸化製錬にある。

さてこの真吹きであるが、これを単に酸化精錬による脱硫過程と理解すると本質を見誤る。それは、この段階では鉄よりも硫黄を酸化する方が先に進むからである。問題は、鉄を酸化させ珪石と反応させて、いかにファヤライト ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) としてスラグオフするかにあるのである。

長々と横道に入ってしまったが、古代の銅製錬で、硫化銅鉱を取り扱い難かったのは、硫黄の存在というよりは、多量の鉄の存在のためであったことを言うためである。従来の解説がうそというわけではないが本当でもない。

結論を急ごう。長登銅山ではやはり酸化銅鉱を中心に還元製錬をおこなっていたのである。その過程で、鉄分の比較的少ない硫砒銅鉱 (Cu_3AsS_4) を併用したと考えれば、種々のデータとつじつまが合う。中国古代の銅緑山における銅も、還元製錬であり鉄分多く状況がよく似ている。したがって、このような還元製錬では、鉱石が枯渇してしまうと黄銅鉱のような硫化銅鉱には手がでなかったのである。

鎌倉時代の新銅山

さて、本題にもどろう。鎌倉時代の後半から相ついで新しい銅山が発見される。寛喜3年(1231)の備中喜多嘉太銅山、文永元年(1264)の羽後太良鉱山、弘安年間(1278～87)の石見笹谷銅山、さら

に康平年間(1342～45)の越前面谷銅山などである。おそらく銅生産の増大を見たであろう。その証左となるのが、足利義教の送った復興遣明船である。その永享5年(1433)の第1次船には、わずかな量とは言え、生紅銅4300斤(2.6トン)を載せており、その翌年の第2次船では152000斤(91トン)に急増している。なお、その前にも応永24年(1417)に、対馬から朝鮮に銅500斤(0.3トン)を送った例もあり、この頃から銅に不自由しなくなっていたと思われる。この後にも、天文8年(1539)に大内義隆が明に銅を180トン輸出した例がある。

硫化銅鉱の酸化製錬法、いわゆる山下吹きが摂津多田荘山下村で銅吹屋新左衛門により始められたのが、16世紀の初めの文亀・永正年間(1501～21)と伝えられている。これより日本の銅生産が飛躍的に伸びたのは間違いないが、私はそれ以前にも新銅山などで、一部酸化製錬法がとられていたのではないかと想像している。古代の銅生産に比較して、遣明船の91トンという数字は決して少ない量ではないからである。こんな見方をするのが、理系の視点である。

江戸時代中期以降の銅生産の盛行についてはすでにふれた。江戸期前半に盛んであった金銀の輸出を禁じた代りに登場した銅の輸出は、貿易政策的な面もあったが、もともとの室町末期からの銅生産の盛況を引継いでいるのは間違いない。貞享元年(1684)から元禄10年(1697)までの14年間に輸出された銅は年平均566万斤(3400トン)であるが、これに密貿易分や国内消費分を加えると、生産量としては6000トン程度には達していたと思われる。長崎や大阪の勤務の経験のある御家人の蜀山人大田南畝も、貞享2年(1685)の状況を130年後に、「銅山三四ヶ所からの毎年銅出高、およそ900万斤、内100万斤は日本、800万斤は異国向けで、この代金拾五万両余」と書き留めている。

人口ひとり当りの銅生産量の推移

江戸時代の中頃、日本における銅の生産量は世界最大で年産6000トン、人口ひとり当りにしても200グラムで、当時のヨーロッパの水準の2倍に達して

いた。その上、古来奈良や鎌倉には巨大な青銅製の
大仏も鎮座している。そのため、日本は古代から銅
の生産に恵まれていたと考えられ勝ちであるが、事
実はむしろ銅不足に悩んでいたのである。すなわち、
奈良時代や平安時代の人口ひとり当りの銅生産量は、
わずかに3～7グラムに過ぎず、これはローマや前
漢、唐の水準の20～40グラムに比較すると、一桁
低い数値なのである。

このように整理して見ると、日本における弥生時
代、古墳時代の銅生産が想像できるようになる。弥
生時代や古墳時代の銅使用量については、改めてふ
れるが、発掘された遺物の銅の総量が10トンにも満
たないこと、そしてその頃の中国では、銅の年産が
2000トンに達していたことなどと比較してみると、
新たな歴史が見えてくる。それが無味乾燥な数値を
まとめる楽しさである。



鉱石熔錬作業（鼓銅図録）

8. 川崎製鉄における高磁束密度方向性珪素鋼板

川崎製鉄は、方向性珪素鋼板RGコアを2段冷延法を基礎とし、インヒビターとしてS, Seを使用する新しい方法を開発[8-1]し、1958年に販売を開始した。Sを含む出鋼材ではまずまずの磁気特性($B_{10}=1.68\sim 1.71\text{T}$, $W_{15/50}=1.35\text{W/kg}$)が得られたが、Seを含む出鋼材は圧延のトラブルから最初は失敗に終わった。Seに関する精力的な研究と開発[11-9, 10]がおこなわれ、1960年にRG-11の製造に成功した。

高磁束密度方向性珪素鋼板については、1973年にRG-Hコア[11-11]が販売開始となった。この方法の特徴は、表11-9に示すように化学成分としてSe, Sbという新しいインヒビターを含み、また比較的低い温度で2次再結晶させるものである。

9. GE社の高磁束密度方向性珪素鋼板

フィードラー(H.C.Fiedler)[11-12, 13]は、BおよびNを含む珪素鋼素材をハイビーと同様に強冷延する工程を発表した。その概要を表11-10に示した。珪素鋼素材中に添加する元素としては、BはAlと同族であり、その窒化物が同じような挙動をすることは考えられ興味ある現象である。しかしながら、Bは添加量が非常に微量であり、現場作業としてはかなりデリケートな制御を必要とするであろう。

さらにフィードラーは、MgO中にBを添加する研

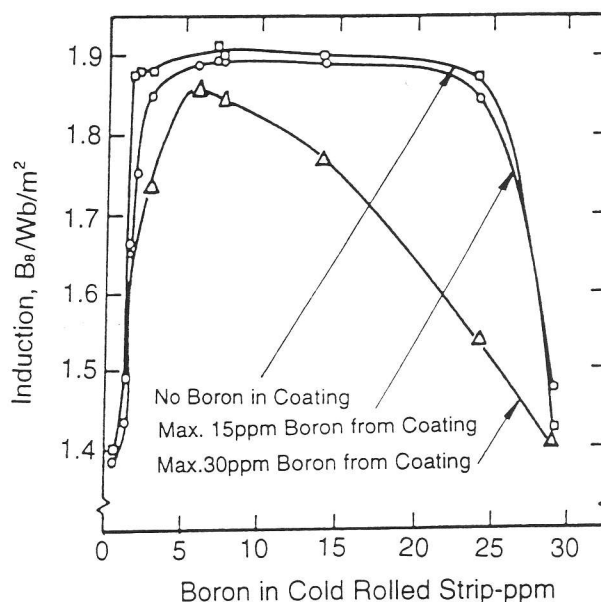


図11-14 Effects of Boron Addition to MgO-Coating on Crystal Orientation [11-12]

究をおこない、B, N, Sが1次再結晶粒の成長を強力に抑制することによって、鋭い(110)[001]方位を持った2次再結晶粒の発生を促進すると述べている。図11-14からわかるように、MgOに含まれるBが珪素鋼中に拡散し、磁氣的性質に顕著な効果を及ぼすのである。ハイビーにおいてもMgOへのB添加は必要条件の1つであるが、この場合は仕上焼鈍の昇温過程でNの侵入を防ぐ被膜を作ることによって、AlNの粗大化を阻止する役目をおこなっていると考えている。しかしながら、ハイビーの場合においてもAlN+BNという相乗効果が働いているのかも知れない。

さらにフィードラーの研究においても、ハイビー

と同様に1段強冷延法、変則2段冷延法が採用されており、冷延圧下率の組合せが鋭い方向性を得るのに重要な技術であることがわかる。

表11-9 川崎製鉄のRG-H(RG)コアの製造方法

・製造工程
出鋼成分(3%Si, Se+Sb(S+Se))→熱延(3(2)mm)→焼鈍→1冷延→中間焼鈍→2冷延(65(50)%)→脱炭焼鈍→仕上焼鈍(900℃保持+1200℃(1200℃))→平坦化焼鈍
・磁気特性(0.30mm)
RG-H(RG): $B_{10}=1.95, 1.92(1.82, 1.83, 1.83)\text{T}$
$W_{17/50}=1.22, 1.07(1.02, 0.96, 0.98)\text{W/kg}$

表11-10 GE社の高磁束密度方向性珪素鋼板の製造方法

・製造工程
・出鋼成分(3.15%Si, 0.24%Cu, 0.033%Cr, 0.035%Mn, 0.031%S, 0.030%C, 0.0006%B, 0.0050%N)→鋼塊
・スラブ加熱→熱延(2.3~3.3mm)→焼鈍(900℃×3分)→
・(1)1段強冷延法: 1冷延(0.28mm, 11mil)→脱炭焼鈍→仕上焼鈍(1150℃)
・(2)変則2段冷延法: 1冷延(1.52mm)→2冷延(0.28mm)→脱炭焼鈍→仕上焼鈍(1150℃)
・磁気特性
・11.2~11.3mil; $B_{10}=1.84\sim 1.90\text{T}$, $W_{15/60}=0.519\sim 0.567\text{W/kg}$, $W_{17/60}=0.677\sim 0.744\text{W/kg}$