



アルミニウム技術史 – ジュラルミンから超々ジュラルミンまで – (第六回) アルミニウム産業の発展 – 第一次世界大戦から第二次世界大戦まで – *

吉田 英雄 **

History of the Aluminum Technology from Duralumin to Extra Super Duralumin (Part 6) Development of Aluminum Industry from World War I to World War II *

Hideo Yoshida **

1. はじめに

これまでWilmのジュラルミンの発明から五十嵐博士らの超々ジュラルミンの発明までのアルミニウムの技術史を述べてきた。アルミニウムの技術史では、地金を製造するアルミニウム製錬の技術についても、多くの日本人技術者が戦前から関わってきたので、この製錬についても少々その歴史を振り返ってみることは、ボーキサイトなどの資源に乏しい日本の今後を考える意味で重要なことだと考える。さらに、第二次世界大戦での日米間の圧倒的な技術差は、航空機の生産量やアルミニウム地金の生産量だけでなくその板材の生産性、特に連続鑄造技術、圧延加工技術にも現れていたもので、これについても述べる。

2. 製錬技術

2.1 世界のアルミニウム製錬¹⁾

1918年から1943年までの各国のアルミニウム地金の生産量の推移をTable 1に示す¹⁾。1934年から1950年までの世界のアルミニウム地金の生産量と消費量の推移をFig. 1に示す²⁾。第二次世界大戦の1943年の200万トン弱がピークであることが分かる。その需要の大半が航空機用であった。参考までに2016年時点での世界のアルミニウム地金の生産量は5,755万トンに及び、1943年の30倍の生産量である。その内訳は、中国が約55%を生産し、これにロシア、カナダを加えた3か国

で生産量の約2/3を占める³⁾。

第一次世界大戦はアメリカに膨大な軍需市場を提供し、アメリカのアルミニウム地金の生産量は1915年の4万1,100トンから、19年には5万8,300トンに急増した。大戦終了後、各国は余剰在庫を抱えたため、欧州からアメリカへの輸出が活発となり、アメリカは国内市場の防衛のため関税障壁を設けてAlcoaの独占を強化することとなった。またAlcoaは1920年代に入ると欧州への進出を図り、ノルウェーの会社に資本参加し、フランス、イタリアの会社を買収した。さらには欧州諸国のボーキサイト資源や水力発電の買収も行い、各地にアルミニウム加工および製品工場を建設した。このようにして、ボーキサイト鉱山、水力発電所、アルミナ製造工場、電解工場、圧延・鋳物などの加工工場を展開し、アメリカのみならず北米大陸さらには第一次世界大戦後も海外の鉱山や製錬工場を系列下におき、世界最大のアルミニウム企業へと成長した。このような海外活動の多角化に伴って、国内事業と海外事業を分離して管理することとなった。1928年カナダにAluminium Limited (1966年Alcan Aluminium Limitedと改称)を設立し海外事業をこの会社に移管した。形式的には別会社として分離したが、大株主は共通なので、事実上Alcoaの支配下にあった。その後トラスト法により1950年完全に分離独立した。1931年世界恐慌に見舞われアメリカ、カナダの生産量は半減したが、国際カルテルと軍備拡張により、1936年以降急速に拡大し、北米の生産は39年22万3,000トンに達し、世界全体の

* 軽金属, 66 (2016), 136-149より転載, 加筆補正。

This paper is the revision of the paper published in Journal of The Japan Institute of Light Metals, 66 (2016), 136-149.

** 超々ジュラルミン研究所, 博士(工学), (元) (株) UACJ R&Dセンター 顧問

ESD Laboratory, Dr. Eng., (Formerly, Research & Development Division, UACJ Corporation, Adviser)

Table 1 Production amount of the aluminum ingot in the world (1918-1943)¹⁾.

Country	Number of ** companies	Number of ** factories	Amount of production (× 1,000 t)			
			1918	1925	1935	1943
France	2	5	12.0	20.0	21.8	46.5
Germany	2	5	14.1	27.2	70.7	203.1
UK	2	4	8.3	9.7	15.1	56.6
Switzerland	2	6	19.9	21.0	11.7	18.5
Norway	5	6	6.9	21.3	16.0	23.5
Sweden	1	1	–	–	1.7	3.6
Spain	1	1	–	–	1.2	0.8
Hungary	1	1	–	–	0.3	9.5
Yugoslavia	1	1	–	–	–	2.0
Austria	2	3	–	–	2.4	44.2
Italy	3	5	1.7	1.9	14.0	46.2
Europe total	22	38	62.9	104.1	154.9	454.5
USSR	government	6	–	–	24.5	62.3
USA	3	16	56.6	63.5	54.1	834.8
Canada	1	4	15.0	15.0	20.6	449.7
India	1	1	–	–	–	1.3
Japan	6	8	–	–	2.7	114.1
Others*	5	6	–	–	–	35.6
World total	38	79	134.5	182.6	256.8	1952.3

* Others include Taiwan, Choson and Manchuria

** The numbers of companies and factories were shown as of 1943.
From “20 years history of Nippon Light Metal”

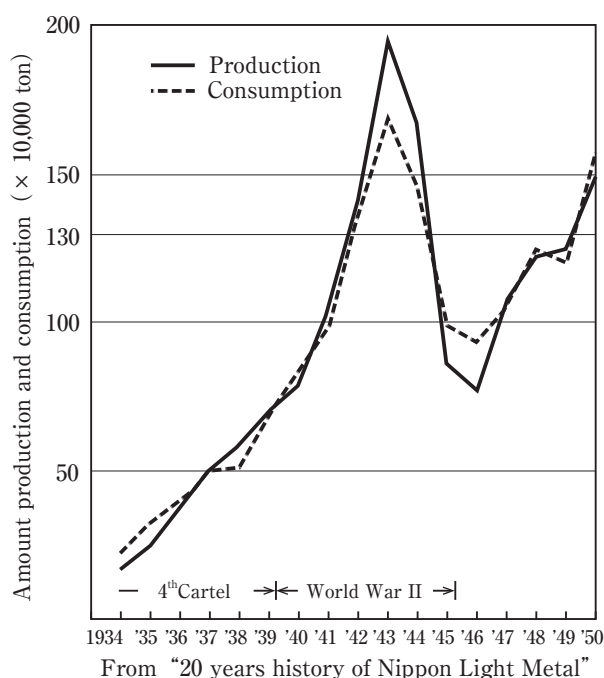


Fig. 1 Changes in the production and consumption of the global aluminum ingot²⁾.

三十分の一を占めた。

第二次世界大戦による軍需の増大は、アルミニウム産業の飛躍的な発展をもたらした。アメリカ政府は一層の設備拡張をするため、1926年以来タバコ包装用アルミニウム箔の生産を行っていたReynolds Metals Corp.

に融資を行ってアルミニウム製錬事業に進出させ、Alcoaの独占が事実上崩壊した。この結果、1943年Alcoaが年産44万トン、Reynolds Metals Corp.が年産8万5,000トンの能力となった。

また政府は国防工場公社(Defense Plant Corporation)が新施設を自ら建設しそれを航空機メーカーやアルミニウムメーカーに貸与する制度をつくり、アルミニウム関係ではDPCが7億ドルの資金を投じて、アルミナ工場を2工場、電解工場を9工場、加工工場を25工場建設し民間業者に委託した。これらの大部分をAlcoaが設計・建設・運営した。1943年には83万4,800トンの生産をあげた。

カナダにおいてはAluminium Limitedが海外事業を展開し、その直系のAlcanがカナダ唯一のアルミニウム企業として発展した。その原動力はカナダ国内の豊富で低廉な水力電源である。1925年Saguenay Riverに20万kwの水力発電所を建設し、4マイル先のArvida(創立者のArthur Vining Davisの頭文字をとって命名)に新工場を建設した。その後も発電所の建設や設備の拡張を行い、1943年には45万トンの生産をあげ、世界第2位を占め、カナダはアルミニウムの世界最大の輸出国となった。同国の第二次世界大戦下1940～44年間の生産量のうち、55%はイギリス、32%はアメリカ、7%はそのほか各国に輸出され、自国内の消費は6%に過ぎなかった。

ドイツの地金生産は第一次世界大戦前までは、スイス系のRheinfelden製錬所が生産する年間800トンに過ぎず、14,000トンにも達していた当時の国内消費は輸入に頼っていた。第一次世界大戦の勃発とともに3製錬工場を建設し、1917年国営のVAW (Vereinigte Aluminium Werke) を設立し、3製錬所と新たに建設した3工場を国営及び半国営とした⁵⁾。軍備拡張を背景として、1918年には14,100トンであったが、1925年27,200トン、1936年70,700トン、1943年203,100トンと増大し第二次世界大戦では、アメリカ、カナダに次ぐ世界第3位の生産国になった。日本は1943年では世界第4位であるが、アメリカの1/8でドイツの約半分の生産量であった。

ドイツは日本と同じくボーキサイトの資源を持っていないので、海外、主として欧州各国にボーキサイト原料を求めた⁴⁾。第二次世界大戦前、欧州では主としてフランス、ハンガリー、イタリア、ユーゴスラビア、ギリシアがボーキサイトを生産していた。第二次世界大戦の始まる1939年以前では、ドイツのボーキサイトはハンガリー、ユーゴスラビアからの輸入が多かったが、第二次世界大戦開始後は、ハンガリー以外にヴィシー政権下のフランス、枢軸国であったイタリアからの輸入が増えた。ドイツの輸入量は第二次世界大戦前までは欧州の生産量の半分を占めていたが、大戦中は欧州のボーキサイト生産量の7割にまで増加した⁴⁾。

2.2 日本のアルミニウム製錬^{1)~5), 12)}

2.2.1 地金の輸入¹⁾

わが国におけるアルミニウム市場の形成は軍需品に始まったことはすでに述べたが、輸入地金は1887年安治川に開設された住友伸銅場にて圧延され、アルミニウム板として砲兵工廠^{ほうへいこうしやう}に納入された。その後民間でもアルミニウム什器^{じゅうき}が製造されるようになり、1900年に約100トンに達した輸入地金は1912年には約1,000トンへと増大した。第一次世界大戦の開始によって、フランス、スイス、イギリスからの地金輸入は中断したが、その間隙を縫って、Alcoaの子会社のNorthern Aluminium Co. (Alcanの前身) が日本に進出し、以来わが国のアルミニウム市場はAlcanの支配下に入った。1920年には地金消費量は約2,000トンに拡大した¹⁾。

2.2.2 古河の地金戦略⁵⁾

古河電工は1908年の日光電気精銅所の完成と同時に製線も開始し、アルミニウム線にも関心を示し、1911年、高橋本枝^{もとえ} (*1) を欧州に派遣してアルミニウム送電線の調査に当たさせた。1919年、古河合名はBritish

Aluminium Ltdとアルミニウム・ワイヤー・バーの独占販売権と技術導入契約を結び、鋼芯アルミニウムの製造を始めた。これに対抗して住友電線もAlcoaからの技術導入により1925年生産を開始した。住友はAlcoaからの原料であったが、古河は競争上、原料を廉価に入手する必要がある。また古河は住友のジュラルミン製造に刺激されて、鳥羽安行技師を東大の航空研究所に派遣し研究させた。1926年陸軍航空本部からジュラルミンの試作命令を受け、1928年には陸軍は日光電気精銅所をジュラルミン板の製造指定工場とする決定を行った⁵⁾。

古河は地金確保のため、古河電工の主催する「三社アルミニウム協議会」(古河電気工業、東海電極、大成化学) が中心となって政府にアルミニウム事業への支援を要請した。委員会と並行して3社が中心になった日本アルミニウム・シンジケートが設立された。

古河の高橋本枝は欧米からの帰国後も朝鮮、中国、東南アジアのアルミニウム鉱石の調査を続け、中国や朝鮮の有力な明礬石^{みょうばん}鉱床を確認したが、アルミナの経済的な生産には欧米と同様ボーキサイトを原料とすることが不可欠であると確信し、Malay半島Johor一帯、Rio群島Batam、Bintan島の調査結果に基づき、採掘願を提出した。しかし採掘権はすでにBilliton社などが有していて蘭印当局によって却下された。1928年Billiton社と交渉して開発に際しては古河に優先権を与えることを確認させ、1934年日本向けに一手販売契約が日本アルミニウム・シンジケートと締結された。

2.2.3 Bintan島ボーキサイトからの製錬

日本アルミニウム・シンジケートは台湾電力などと電力を契約し、1935年Bintan島ボーキサイトによるBayer法でのアルミナ生産のための日本アルミニウムを設立し、台湾高雄にアルミナ工場、電解工場を建設した。新会社には三井、三菱、古河、台湾電力などが出資した。年産6,000トン規模で生産を開始した。1938

脚注*1

高橋本枝^{もとえ} (1877-1955)⁵⁾ : 1877年伊達藩の儒者であった岡千仞^{せんじん}の次男として生まれ、裁判官であった高橋易直の長女淑子と結婚して高橋家を継いだ。東京府立一中、一高を経て、1901年京都帝国大学電気工学科を卒業、古河鉱業会社に入社。1910年まで足尾銅山に勤め、1910年アルミニウム線の調査のため欧米に出張、1911年帰国し、古河合名会社本店技師を経て、1918年古河商事技術課長、1921年古河電工技術課長、古河電工取締役。1931年古河電工取締役辞任、同社嘱託を経て顧問。1939年日本軽金属株式会社取締役就任し、1943年辞任。30年以上にわたってアルミニウム線とアルミニウム地金関連の仕事に携わった。高橋は学究的な性格から日本におけるアルミニウム産業の先覚者として製錬や加工の創業に指導的な役割を果たした。

年Billitonとの契約は日蘭商事が窓口になり、Bintan 島ボーキサイト (Al_2O_3 : 55 ~ 56 %, SiO_2 : 3 ~ 4 %, Fe_2O_3 : 9 ~ 11%)⁵⁾は日本アルミニウム以外に日本曹達^{ソーダ}や住友アルミニウム製錬にも販売された。1941年の太平洋戦争とともに古河鋳業が軍から委託され鋳山運営に当たった。日本電工、住友化学も1937年頃からコスト的に有利なボーキサイト原料に転換した。1936年には日本曹達、満州軽金属の2社が、1937年には東北振興アルミニウムがアルミニウム製錬に進出した。アルミニウム製錬工業創始期における各社の状況を **Table 2** にまとめる^{2), 6)}。

1939年古河電工と東京電灯との共同出資で日本軽金属(株)が設立され、地金年産能力5.4万トン有するわが国最大のアルミニウム製錬会社ができた。1933年から1945年までの日本のアルミニウム生産量を **Table 3** にまとめる^{2), 6)}。終戦時にはわが国の地金生産能力は年間、内地13万トン、外地(朝鮮、台湾)5.4万トンの規模に達し、アメリカ、カナダ、ドイツに次いで世界第4位を占めた¹⁾。その需要は軍需に極めて偏っていた。

2.3 国産原料からの製錬技術

2.3.1 アルミナの製造法、アルカリ法と酸法⁷⁾

アルミナは両性化合物でアルカリにも酸にも溶けるので、アルミナ製法には大別してアルカリ法(湿式、乾式)と酸法がある。

(1) アルカリ法(湿式法)

水に溶解しているアルミン酸ソーダにアルミナを結

合させるためにアルカリ(苛性ソーダ、炭酸ソーダ)で原鉱石を処理する。この処理によって鉄、ケイ素、チタンなどの不純物は赤泥となって分離され、アルミン酸ソーダから水酸化アルミニウムを分離する。アルカリ法では鉄やチタンの分離は比較的容易であるが、ケイ素はアルカリに容易に溶解するからアルカリ法においてはできるだけケイ素の少ない原鉱石を使用することが望ましい。アルカリ法の基になっているのはBayer法で現在も広く利用されている。Bayer法の製造工程を **Fig. 2** に示す。

(2) アルカリ法(乾式法)

原鉱石をアルカリ土類金属塩またはアルカリ金属塩(炭酸ソーダ、炭酸カルシウムなど炭酸塩)とともに回転炉で加熱乾燥するか、アーク炉で固体アルミン酸塩を得るために溶融させる。アルミン酸塩は水またはソーダ溶液によって抽出するとアルミン酸ソーダ溶液が得られ、これを分解させて水酸化アルミニウムを得る。

(3) 酸法

原鉱石を無機酸(硫酸、塩酸、硝酸)で処理すると硫酸アルミニウムまたは3塩化アルミニウムなどになり、それを分解して水酸化アルミニウムを得る。酸法では鉄及びチタンの酸化物は多少溶解するが、ケイ素はほとんど溶解しない。酸溶液からの鉄の除去はかなり難しいので鉄の含有量の少ない原鉱石を使用することが望ましい。また装置が耐酸性のものであることが必要である。

Table 2 Japanese smelting companies in the beginning of the aluminum smelting industry^{2), 6)}.

Company	Sumitomo Aluminum	Nippon Denko	Nichiman Aluminum	Nippon Aluminum	Nippon Soda	Chosen Chisso	Manshu Light Metal	Tohoku Sinko Aluminum
Capital (M ¥)	10	50	10	10	16	8	25	10
Foundation Date	1934.6	1938	1933.11	1935.6.21	—	—	1936.11.10	1937.12.23
Production Capacity (ton)	3,000	7,000	5,000	6,000	3,000	4,000	4,000	4,000
initial (ton)	1,500	5,000	3,000	6,000	2,000	4,000	4,000	
future (ton)	3,000	10,000	—	14,000	6,000	—	10,000	
Year of Operation	1936	1934.1	1936.1	1936.11.29	1937.5.1	—	1938.6	
Alumina Production Factory	Sumitomo Chemical, Shicama Chemical	Yokohama Works	Iwase Works	Takao Works	Takaoka Works	Kounan Works	Fushun Works	—
Kind of Ore	Alunite	Alunite	Alum Shale	Bauxite	Bauxite	Alunite	Alum Shale	—
Mine of Ore	Korea, Okumesan	Korea, Seizan	Manchuria (PRC, Northeast China), Yantai	Dutch East Indies	Dutch East Indies	Korea, Kasari	Manchuria (PRC, Northeast China), Yantai, Benxi	—
Production Process of Alumina	Sumitomo Process, Asada/Taniguchi Process	Okazawa/Tanaka Process (Koshi Process)	Suzuku/Tanaka Process (Riken Process)	Bayer Process	Own Technology	Dry Process (Soda Lime Process)	Ammonium Sulfate Process (Dry and Wet Combined Process)	—
Electrolysis Factory	Niihama Works	Oomachi Works	Iwase Works	Takao Works	Takaoka Works	Kounan Works	Fushun Works	—
Electrode Production	self-supply	self-supply	self-supply	self-supply	self-supply	self-supply	self-supply	—
Cryolite	purchase	purchase	purchase	purchase/self-supply	self-supply	self-supply	self-supply	—
Electric Power	Shikoku Chuou Power	private power, Toshin Electric	Nihonkai Power, Prefecture Power	Taiwan Power	Nippon Power	private power	Tankou Power	—

Added to Table 2.2 in "Aluminum Industries" by Takayuki Nakajima and Sumio Muratsu

Table 3 Trend of the aluminum production up to 1945⁶⁾.

(1) Japan

Company	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945*
Nippon Light Metal (Kanbara)	–	–	–	–	–	–	–	2,024	10,219	16,524	34,604	24,793	1,709
Nippon Light Metal (Niigata)	–	–	–	–	–	–	–	217	6,880	14,739	19,284	12,833	200
Nippon Soda	–	–	–	–	953	2,753	4,413	5,090	5,418	9,119	10,390	8,723	349
Showa Denko (Kitagata)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	166	5,061	765
Showa Denko (Oomachi)	19	1,002	2,997	3,533	6,168	8,995	9,464	10,233	16,276	19,685	21,655	13,740	439
Showa Denko (Toyama)**	–	–	214	1,187	3,471	3,517	3,289	3,713	3,829	5,531	5,834	5,304	987
Sumitomo Aluminum	–	–	–	872	1,066	2,494	3,113	6,971	11,453	16,443	18,668	15,421	955
Tohoku Sinko Aluminum	–	–	–	–	–	–	1,379	2,372	2,008	3,170	3,456	2,368	0
Total	19	1,002	3,211	5,592	11,658	17,759	21,658	30,620	56,083	85,211	114,057	88,254	5,404

* From April 1 to June 30.

** The production data of Nichiman Aluminum from 1935 to 1942, this company was merged with Showa Denko in 1943.

(2) Korea and Taiwan

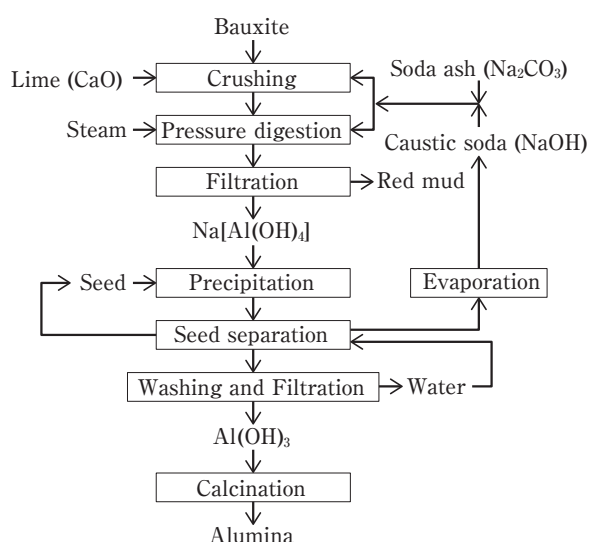
Company	1936	1937	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945*
Chosen Light Metal**	–	–	–	–	–	582	2,266	3,579	2,838	382
Mitsui Light Metal ***	–	–	–	–	–	–	–	5,690	6,009	328
Nippon Chisso	–	–	–	240	1,481	2,538	2,100	3,260	4,096	533
Total	–	–	–	240	1,481	3,120	4,366	12,529	12,943	1,243
Nippon Aluminum (Karekou)	–	–	–	–	–	329	1,415	3,813	1,638	0
Nippon Aluminum (Takao)	210	2,776	4,608	7,661	8,762	12,218	12,083	10,685	7,563	0
Total	210	2,776	4,608	7,661	8,762	12,547	13,498	14,498	9,201	0

* From April 1 to June 30.

** The production data of Chosen Riken from 1941 to 1943, this company was renamed to Chosen Light Metal in 1944.

*** Toyo Light Metal became Mitsui Light Metal in 1943.

From "Aluminum Industries" by Takayuki Nakajima and Sumio Muratsu.

**Fig. 2** Diagram of Bayer process.**2.3.2 白粘土からの製錬—日本軽銀¹⁾**

国産地金に関しては、1916年日本軽銀（株）が年産200トンの電解工場を名古屋に建設したのがわが国最初アルミニウム製錬企業である。この計画は知多半島の白粘土を原料として苛性ソーダで処理してアルミ

ナを製造し電解するという方式であった。しかし原料が不適でコスト的に合わず一年で閉鎖された。その後、同社の経営は藤田組（同和鉱業）に委ねられ、名古屋工場を研究を続け、1918年長野県大町に電解工場を建設した。この工場は藤田組系列の明治水力電気の3万kwの電源開発に対応したものであったが、第一次世界大戦後の不況で挫折した。

2.3.3 明礬からの製錬—昭和電工、住友化学^{1), 5), 7)~9)}

1931年9月の国際連盟脱退以降、アルミニウム地金の輸入に不安があり、当時、日本の統治下にあった朝鮮の明礬石や満州の礬土頁岩を用いて地金を国産化する機運が急速に高まった。浅田明礬製造所の浅田平蔵は日本沃度^{ヨード}（その後1934年日本電工、1939年昭和電工）で朝鮮の玉埋山明礬石^{オクメ}（*2）を用いて、自分の発明した浅田法（*3, Fig. 3 (a)）で試験をした。しかし、日本沃度はその後、浅田法ではなく東京工業試験所の田中弘博士の田中法（*4, Fig. 3 (b)）を採用し¹⁾、1934年日本電工は横浜にアルミナ工場、大町に電解工場を建設し、アルミニウム製錬の企業化に成功した¹⁰⁾。しかし、その後ボーキサイトのほうが回収率のよいこと

が分かったため1937年ボーキサイトに切り替わった。

浅田は日本沃度を諦め住友化学で製造を試みたが、浅田法では装置が硫酸で腐食され、耐酸性の装置にする適当な材料もなくて順調に操業できなかった。住友化学は同社で開発した住友法(*5, Fig. 3(c))によって明礬石からアルミナ製造を行い、1934年、年産1,500トンの製錬能力を有する住友アルミニウム製錬(株)を発足させた。結局、住友化学も明礬からのアルミナの回収は技術面でもコスト面でもうまくいかず、また不純物が多くジュラルミンには使えないとのことで、住友も1938年ボーキサイトに切替えた。

2.3.4 礬土頁岩からの製錬

— 日満アルミ, 満洲軽金属^{13)~16)}

礬土頁岩(*6)にはアルミナ分が多いため、ボーキサイトの供給が途絶えた場合のことを考えて礬土頁岩をアルミニウムの原料にすることが国策として検討された。礬土頁岩はボーキサイトに比べ風化の度合いが小さいためか珪石が多い。ボーキサイトはケイ酸分が少なく5%以下であるが、礬土頁岩は少なくとも10%、

脚注*2

玉埋山の明礬石の成分¹¹⁾: Al_2O_3 : 24~33%, SiO_2 : 14~15%, SO_2 : 22~33%, Fe_2O_3 : 0.5~15%, K_2O : 6~8%, H_2O : 9~10%。

脚注*3

浅田法: 酸法の一つで、明礬石を焙焼し、硫酸を添加すると溶液は硫酸礬土(硫酸アルミニウム)となって、ケイ酸および鉄は残渣中に残り、分離ろ過すると粗明礬が得られる。さらに加圧分解して硫酸カリと硫酸礬土が得られ、焙焼後に水で抽出して水酸化アルミニウムが得られる方法。

脚注*4

田中法: 明礬石を焙焼分解し、アンモニア水で処理してその含有する硫酸分を硫酸アンモニウム、カリウム分を硫酸カリウムとし抽出液を蒸発させ、硫酸カリウム硫酸アンモニウムの混合物をつくる。抽出残渣は苛性ソーダで処理してアルミン酸ナトリウム液をつくり、これを炭酸ガスで分解して水酸化アルミニウムを析出させ、焼成してアルミナとする。母液の炭酸ナトリウム液は苛性化して工程に循環させる方法。

脚注*5

住友法: 明礬石を粉碎して焙焼しさらに粉碎し硫酸を添加して粗明礬と硫酸礬土に分離する。硫酸礬土をアンモニアで中和すると水酸化アルミニウムが得られ、これを苛性ソーダに溶解してアルミン酸ソーダにする。沈殿槽で水酸化アルミニウムを析出させると、ケイ酸および鉄は残渣中に残る。アンモニアで中和して水酸化アルミニウムをろ過した後のろ液から硫酸カリおよび硫酸アンモニウムを得る方法。

脚注*6

礬土頁岩: 1924年煙台(中国東北地方の鞍山と瀋陽の中間に位置する)にある煙台炭鉱で耐火粘土の調査中に発見された。粘土の中には微細なダイアスポア結晶を極めて多く含むことが確認され、当時の地質調査所長村上敏蔵博士によって「礬土頁岩」と命名された¹²⁾。

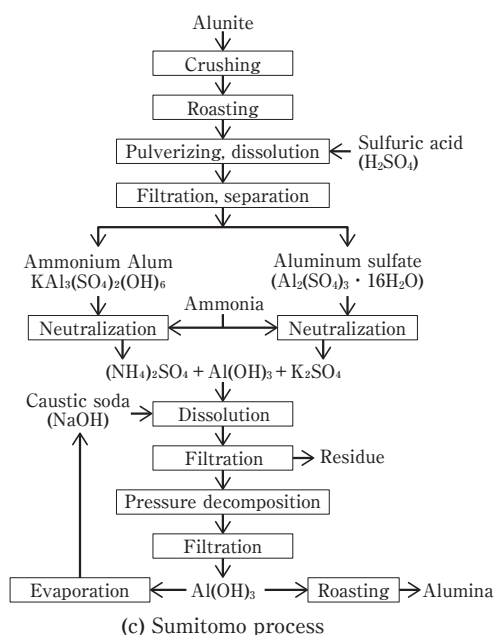
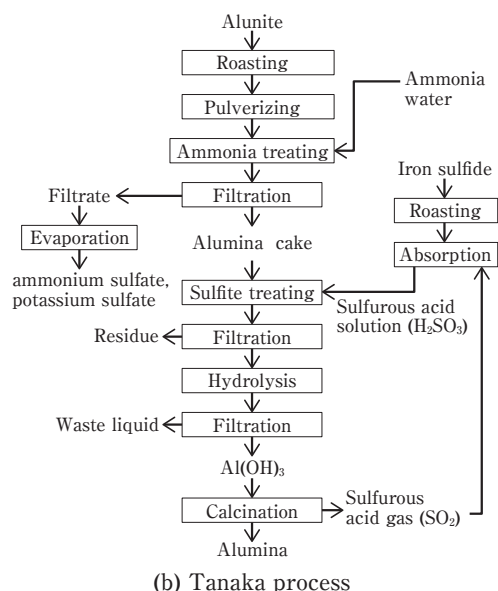
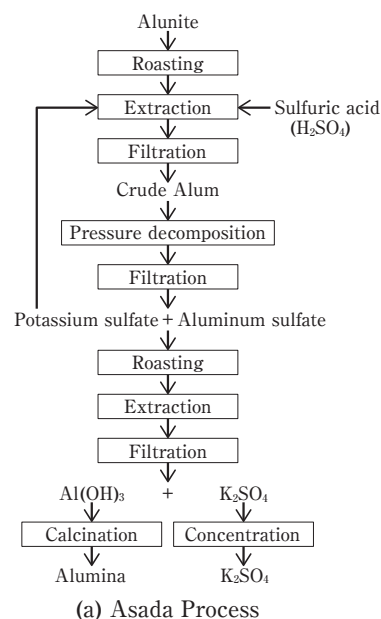


Fig. 3 Processes to extract alumina from alunite^{7)~9)}.

多いものは40%もあり、苛性ソーダで処理してもケイ酸分が溶け出してしまう難点があり、ボーキサイトから製造するBayer法に比べてこれらの不純物を取り除く工程が増え採算がとれるかどうかが課題であった。

(1) 日満アルミニウム

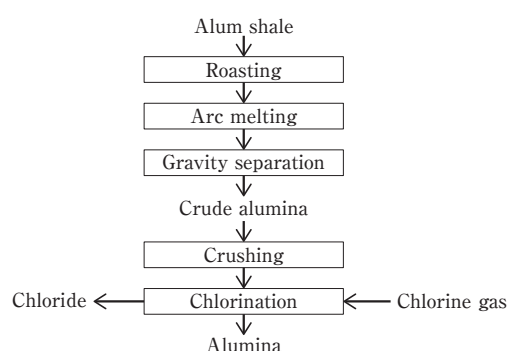
理化学研究所の鈴木庸生博士は満洲の礬土頁岩を用いて、「鈴木式乾式法（鈴木法）」（*7）と呼ばれる製造法（Fig. 4 (a)）^{7)~9)}を開発した。1933年この方式を採用した日満アルミニウム(株)が設立され、富山県東岩瀬町に工場を建設した。同工場は年産3,000トンの規模で1935年操業を開始した。日満アルミニウムは1942年昭和電工に買収され、同社の富山工場となった。

(2) 満鉄中央研究所、満洲軽金属

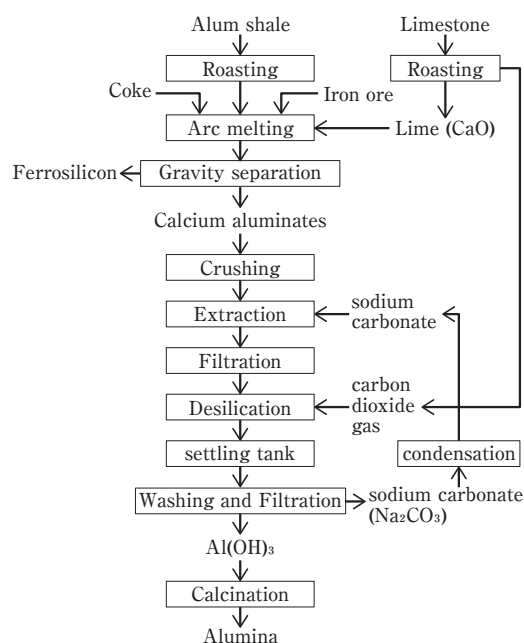
満鉄中央研究所にても礬土頁岩からアルミナを抽出する研究開発がなされ、彼らの研究では礬土頁岩の高品位鉱と低品位鉱では製造方法が異なり、高品位鉱（ Al_2O_3 : 50%, SiO_2 : 20%, Fe_2O_3 : 10%）ではケイ酸

が少ないのでアルカリ法でかつ乾式が、低品位鉱（ Al_2O_3 : 20 ~ 40%, SiO_2 : 40%, Fe_2O_3 : 3%）ではケイ酸が多いので酸法がよいと判断された。

満鉄ではすでに量の多い低品位鉱から硫酸にてアルミナを製造する小規模実験がなされていたが、満鉄は関東軍からの強い要請で理研の鈴木法で取り組み始めた。満鉄は日満アルミニウムから鈴木法の特許の使用権を得て、日満アルミニウムには礬土頁岩を供給する契約を結んだ。1934年には奉天（現在の瀋陽）に近い撫順に試験工場ができた。電力は撫順炭鉱発電所から供給を受けた。満鉄中央研究所の内野正夫技師（*8）は、高温塩素ガスの取扱い、熔融させたアルミナの粉碎、アルミナの電解の困難さに悩まされた。最後のアルミナの電解問題は酸法でつくったアルミナを加えると反応が進みうまくいくことが分かり、礬土頁岩からアルミナができることが実証された。内野らは「満洲軽金属法」（*8, 9）Fig. 4 (b)）を完成させ、1936年11月満洲軽金属製造株式会社を設立させ、年産4,000トンの工場を撫順に建設し、1938年操業を開始した。その工業化を満洲軽金属が行い、日本独自開発の技術としてアルミニウムの製錬に成功した。



(a) Suzuki process (Riken process)



(b) Manshu keikinzoku Process

Fig. 4 Processes to extract alumina from alum shale^{7)~9)}.

脚注*7

鈴木式乾式法：礬土頁岩を電気炉でコークスと一緒に高温で熔融させ、ケイ酸、酸化鉄、酸化チタンを還元させて、熔融した「ケイ素チタン鉄」と「アルミナ」を比重差で分離させ、分離したアルミナに塩素ガスを通じて不純物を除去する方法。

脚注*8

内野正夫（1892-1973）^{5), 13)}：熊本県生まれ、熊本中学、五高を経て、1916年東京帝国大学工学部応用化学科を卒業。古河鋳業に入社し、足尾や大阪で銅の製錬法の開発に携わった。後に大阪工業試験所を経て、1932年満鉄に入社して、大連の満鉄中央試験所無機研究部に属し、アルミニウム製錬法の開発を担当した。そのときの成果をもとに、1934年から撫順で満洲軽金属の立ち上げに従事した。1941年満洲軽金属第二期工事完成後、健康上の理由もあって内野は会社を辞めて、郷里の熊本に戻った。アルミニウム製錬以外に満洲に豊富に存在するマグサイトの資源を利用したマグネシウムの製錬にも携わった。

脚注*9

満洲軽金属法：3段階からなり、第1段階が鉱石から礬酸石灰（アルミン酸カルシウム）を製造する工程で、焙焼炉で礬土頁岩と石灰石を焼いて、水分や有機物を除去し、アーク炉で熔融させ、コークスと鉄を添加する。還元反応でケイ素鉄が形成され沈殿する。上澄み液から礬酸石灰を取り出す。第2段階は礬酸石灰から精製アルミナを製造する工程である。溶解槽で礬酸石灰に炭酸ソーダを加えるとアルミン酸ソーダが生成し、これを洗浄シッケナーでろ過し、その後、脱ケイ酸処理を行う。上澄み液は精製槽を通して沈殿槽に導かれ、炭酸ガスを吹き込むと水酸化アルミニウムが沈殿する。脱水処理後ロータリーキルンで焙焼するとさらさらのアルミナができる。第3段階は精製アルミナから金属アルミニウムを取り出す電解工程である。

2.3.5 森永卓一^{ホーコーツ}「火鍋子」より¹⁵⁾

森永卓一^{たくいち} (*10, Fig. 5左) は当時旅順工科大学にいた大日方一司教授^{おびなたいちじ} (*11, Fig. 5右) の世話で1935年満鉄中央研究所に入所した。アルミニウムの応用方面を調べろとのことで無機化学科の中に入れられた。その時の科長が内野正夫であった。そこは化学屋の世界で金属屋は森永だけで金属屋の使用するような装置は一つもなかったとのことである。その後満洲軽金属に移

脚注*10

森永卓一^{たくいち} (1905-1986)¹⁷⁾ : 1905年山口県に生まれ、1931年旅順工科大学冶金学科を卒業し、大阪帝国大学工学部研究生となる。1935年南満洲鉄道株式会社中央研究所に奉職、1937年満洲軽金属製造株式会社に転出。1944年満洲軽合金工業株式会社技術部長になり、新京工業大学、旅順工科大学の講師も兼務。この間、礮土頁岩からのアルミニウムの生産体制の確立、ジュラルミンの研究、健全なアルミニウム鋳塊製造の研究に没頭した。敗戦とともにソ連による満洲軽金属の解体を見届け引き上げた。戦後、1949年高岡工業専門学校、1950年富山大学を経て、1951年東京工業大学教授となり、1965年同大学を定年退官、1979年東京工業大学名誉教授となる。1973年から1977年まで千葉工業大学非常勤教授として勤務。また1965年より社団法人軽金属協会の顧問として業界の指導に携わり、1969年から二年間軽金属学会の副会長に就任し学会と業界の連携強化に努めた。研究ではアルミニウムダイカスト技術の確立、低圧鋳造技術の基礎研究、溶湯鍛造技術の基礎研究を行った。著書も数多く、「デュラルミン」(1943年) (Fig. 6左¹⁸⁾)、「鋳物用アルミ合金」(1955年)、「非鉄冶金学」(1958年)、「アルミニウム製錬」(1968年)、「アルミニウム合金鋳造学」(1969年)、「アルミニウムおよびその合金の押出加工」(1970年)、「非鉄金属顕微鏡写真集」(1972年)、「軽合金の鍛造」(1982年)など実践的な内容が多く、現場技術者に役立つテキストとなっている。なお池野進富山大学名誉教授が、高岡アルミニウム懇話会の「アルミ情報」¹⁹⁾などに、森永先生が満洲から引き上げてきた池野名誉教授の父を旧北陸軽金属に呼んだ経緯とその後の話を書かれている。

脚注*11

大日方一司^{おびなたいちじ} (1902-1969)²⁰⁾ : 1902年長野県に生まれ、四高を経て1926年東京帝国大学工学部採鉱冶金学科卒業とともに旅順工科大学に赴任。在任中にドイツ留学しX線金属組織学を学び、「X線金相学」を著した。1936年工学博士(東大)が授与され、旅順工科大学教授に昇任。1940年東北帝国大学金属材料研究所教授に転任し、軽合金部を担当。1942年から1950年まで東京帝国大学第二工学部の併任講師、教授として研究、教育に携わった。1943年、啓蒙書「朝日科学新輯9 デュラルミン」(Fig. 6右²¹⁾)を出版。1952年から1954年まで東京大学生産技術研究所の併任講師として研究所の発展に尽力した。1958年東北大学金属材料研究所所長、日本金属学会会長の要職に就任。1967年より2年間軽金属学会副会長として学会の発展に尽力した。研究に関して、旅順時代、金研時代(戦前戦中)、金研(戦後)ではかなり違って、旅順時代はアルミ青銅のマルテンサイト変態をX線で調査、その後ベルリンへ留学、Wassermannと共同研究、満洲でのアルミニウム工業勃興とともにアルミニウムやマグネシウムに関する研究を開始した。金研時代の戦前はアルミニウムやジュラルミンに対する不純物の影響、Al-Snの状態図、Al-Mn系の強制固溶体の研究、ジュラルミンの高温加工と再結晶、ジュラルミンのS相の組成決定、戦中はHD (Honda Duralumin) 合金やND (Nippon Duralumin) 合金の開発、アルミニウム地金の再生技術確立を、戦後はチタンの研究を行ったと述べている。

るが、1936年の満洲軽金属の設立から1945年のソ連による設備の解体撤去までの約10年間の「舊満洲國に於ける軽金属工業の實相」(「軽金属時代」に連載執筆した時のタイトル)をまとめて「火鍋子」という小冊子にした。当時の満洲における関東軍や国策会社の人間関係の実態が分かる内容である。満洲軽金属が設立された撫順には精油、石炭液化、軽金属、特殊鋼などの先端的な総合コンビナートが形成された。この工業化のための先端研究を行っていたのが大連にあった満鉄中央研究所であった。この撫順の先端コンビナート都市については^{みさと}末里周平の「消えた理想郷」¹⁶⁾が詳しい。また満洲軽金属の社友しろがね会がまとめた「彼方の礮土」(木村仁信編著)¹³⁾にも満洲軽金属の誕生から終焉までが詳細にまとめられている。

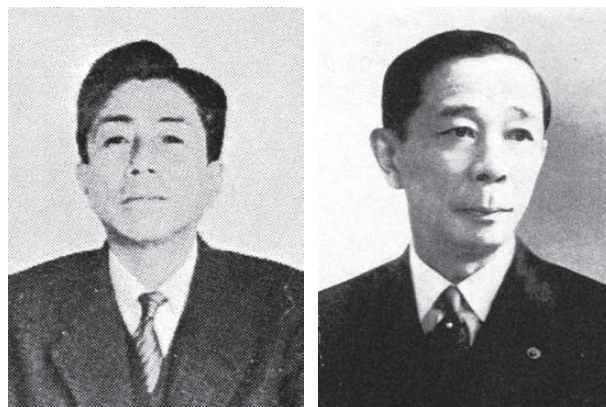


Fig. 5 Prof. Morinaga^{*)} and Prof. Obinata^{**)} from ^{*)} Japan Institute of Light Metals, 13 (1963), 379. ^{**)} *ibid.*, 19 (1969), No.6, 12.

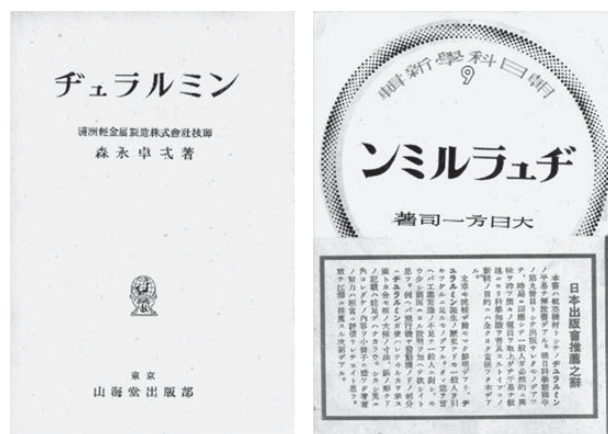


Fig. 6 Textbook and the primer on duralumin by Prof. Morinaga and Prof. Obinata^{18), 21)}.

3. 圧延技術

3.1 Alcoaの新技術による生産力増強

3.1.1 アメリカの航空機の需要²²⁾

第一次世界大戦で航空機が戦争遂行にとり、はるかに重要であることが認められたが、欧州で戦争が勃発した1939年における軍用機の生産数を比較すると、アメリカでは2,141機で、日本の4,467機、ドイツの8,295機よりはるかに少なかった。1940年春のドイツの奇襲攻撃でドイツ空軍の優れていることが分かり、ルーズベルト大統領は年間5万機の航空機を生産する声明を発表した。生産を推進するために国防助言委員会(National Defense Advisory Commission)に自動車メーカーGMの社長W. S. Kundsénを任命し、生産を指揮させた。

この計画には巨額の生産設備を要するが、航空機各社の資金では不足するために、復興金融公社RFC(Reconstruction Finance Corporation)の子会社として国防工場公社DPC(Defense Plant Corporation)設置の制度がつくられた。この制度により軍が自ら工場施設を建設しそれを航空機会社に運営させるようになり、資金問題は一応解決した。新工場の建設、航空機が生産が急増したのは1941年真珠湾攻撃以後であった。大統領は1942年6万機、1943年には12万5,000機が生産目標を掲げた。当初、自動車メーカーの量産体制を利用すれば短期間に大量の航空機が生産可能であると考えられていたが、航空機と自動車では部品数も大きく違うことに加え航空機では絶えず設計変更があり、これに対応するには従来の自動車メーカーのシステムをそのまま持ち込むことは困難であることが分かった。

その後、流れ作業が容易な生産組織の整備、組立の大部分の下請化、労働者訓練、権限の分散などによる生産能力の大幅増加がなされ、このような技術進歩には自動車量産方式を航空機の生産に導入しようとしたFord社との提携に負うところが少なかった。実際、爆撃機B-24の生産では、他の航空機メーカーが1日1機の生産能力に対し、Ford社は24時間体制によって1時間1機でB-24を生産したと言われている²³⁾。また自動車メーカーは主として航空機の部品やエンジンの製造にあたっていた。**Table 4**は第二次世界大戦中に製造された参戦諸国の航空機生産数の推移を示す²⁴⁾。1944年で比較するとアメリカは日本の約4倍である。日米間の比較を軍用機のカテゴリーごとに分けたのが**Table 5**である²⁵⁾。単発の小型機ではアメリカは日本の約3倍の生産力を持ち、輸送機や大型(四発)爆撃機にいたっては、日本は圧倒的に少なかったというのが航空機生産数からみた太平洋戦争であった。

3.1.2 Aluminum Research Laboratories (ARL) の役割^{5), 26)}

Alcoaは1927年頃から、航空機メーカーのCurtiss社、Boeing社、Douglas社などと直接、全金属航空機をデザインの段階から共同で行うなどほとんど独占的なアルミニウム材料供給者となっていた。Alcoaはアルミニウムの構造材の設計まで助言できる専門家を揃えていて、Aluminum Research Laboratories (ARL) がそのための大きな役割を担っていた。1940年には220名の学卒の研究者を抱え、17の化学研究所、11の物理試験センターと1つのモーター試験所を持ち、554名のスタッフが研究開発に従事していた⁵⁾。フランスで墜落

Table 4 Aircraft production in World War II participating countries²⁴⁾.

Year	Japan	Germany	Italy	UK*	USA	USSR
1939	4,467	8,295	1,750	7,940	2,141	10,400
1940	4,768	10,826	2,723	15,049	6,019	10,600
1941	5,088	11,776	3,487	20,094	19,433	11,500
1942	8,861	15,556	2,818	23,672	47,836	25,400
1943	16,693	25,527	2,741	26,263	85,898	34,900
1944	28,180	39,807	1,043	26,461	96,318	40,200
1945	11,066	7,540		12,070	47,714	20,900
Total	79,123	119,327	14,562	131,549	305,359	153,900

* The number in 1945 is the value until September from Central Statistical Office, "History of the Second World War United Kingdom Civil Series- Statistical Digest of the War" (London: His Majesty's Stationary Office, 1951), 152; Irving Britton Holly, Jr. "United States Army in World War II Special Studies - Buying Aircrafts: Material Procurement for the Army Air Forces" (Washington D.C.: United States Government Printing Office, 1964), 548-555; Grigori F. Krivosheev ed., "Soviet Casualties and Combat Losses in the Twentieth Century", Christine Barnard tr., (London: GreenhillBooks, 1993), 244; Hans Werner Neulen, "In the Skies of Europe - Air Forces Allied to the Luftwaffe" 1939-1945, Alex Vanags-Baginskies tr., (Wiltshire, U.K.: Crowood Press, 2000), 329-331; United States Strategic Bombing Survey, "The Japanese Aircraft Industry" (n.p.: United State Government Printing Office, 1947), 155; "Aircraft Production during World War II" MSN Encarta <http://encarta.msn.com/media_701500594_761563737_1_1/Aircraft_Production_During_World_War_II.html>, accessed on Aug. 30, 2005, now closed. ref. <https://en.m.wikipedia.org/wiki/World_War_II_aircraft_production> http://www.nids.mod.go.jp/event/proceedings/forum/pdf/2005/forum_j2005_06.pdf

Table 5 Comparison of the number of the military aircraft production by category between Japan and USA during World War II²⁵⁾.

Type of Aircraft	Japan	Number produced	USA	Number produced
Fighter (Number produced: 5000 or more)	Navy Type Zero Carrier Fighter	10,425	Navy F4F Wildcat	8,061
	Army Type 1 Fighter Hayabusa	5,751	Navy F4U Corsair	12,571
			Navy F6F Hellcat	5,200
			Army P-38 Lightning	9,924
			Army P-39 Airacobra	9,558
Attack, Bomber (Single engine) (Number produced: 2000 or over)			Army P-40 Warhawk	16,802
			Army P-47 Thunderbolt	15,634
			Army P-51 Mustang	15,586
	Others	15,091	Others	4,045
	Total	31,267	Total	97,381
Attack, Bomber (Twin engines) (Number produced: 2000 or over)	Navy Carrier Bomber Suisei	2,157	Navy SBC Helldiver	7,140
			Navy SBD Dauntless	5,936
			Navy TBF Avenger	9,837
Attack, Bomber (Twin engines) (Number produced: 2000 or over)	Others	7,669	Others	2,181
	Total	9,826	Total	25,094
Attack, Bomber (Twin engines) (Number produced: 2000 or over)	Army Type 97 Heavy-Bomber	2,064	Army A-20 Havoc	7,385
	Navy Type 1 Attack-Bomber	2,416	Army B-25 Mitchell	10,000
			Army B-26 Marauder	5,157
			Army A-28 Invader	2,466
	Others	7,235	Others	1,865
Bomber (Four engines) (Number produced: 2000 or over)	Total	11,715	Total	26,873
			Army B-17 Flying Fortress	12,731
			Army B-24 Liberator	19,203
Bomber (Four engines) (Number produced: 2000 or over)			Army B-29 Superfortress	3,970
	Others	384	Others	
	Total	384	Total	35,904
Cargo transport (Number produced: 2000 or over)			Army C-45 Expeditor	4,500
			Army C-46 Commando	3,140
			Army C-47 Skytrain	10,048
	Others	1,466	Others	1,789
Cargo transport (Number produced: 2000 or over)	Total	1,466	Total	19,477
	Total	54,658	Total	204,729

The names and produced numbers of the typical military aircraft with a certain production volume or more are shown. Any other aircrafts with low production is included in the others. Production of the military aircraft such as reconnaissance aircraft, seaplanes, and training aircraft were omitted.

したツェッペリン飛行船の桁の破片をAlcoaに送って研究を依頼したJ. Hunsaker海軍中佐は「海軍が革新的な金属材料を使用して未踏の加工製品を作ろうとした時に、Alcoaが金属とその加工方法の開発を同じ屋根の下で行ってくれたことは大変な貢献であった」と語っている。アルミニウム構造材に関する基礎研究は1930年代以降の航空機や鉄道車両のアルミニウム化に役立った。構造材料の技術者で、のちにAlcoaの技術担当役員になるE. Hartmannはアルミニウム自動車の原型デザインと分析のために自動車メーカーのPullman社に8ヶ月も出向した。AlcoaはHamilton Standard社、Douglas社、Boeing社などの航空機メーカーと緊密に協力することで25種類もの新合金を開発した。

3.1.3 連続鋳造技術の進歩^{26), 27)}

ドイツやアメリカではアルミニウムの生産性を上げるために、圧延、鍛造、押出用インゴットの大型化が要求されるようになった。従来の金型に鋳込む鋳造方法では介在物、偏析、キャビティ、シュリンケージ・キャビティ、柱状晶、引け巣等の鋳造欠陥の発生が問題となったため、新たな鋳造方法の開発が必要になった。特に結晶粒微細化と逆偏析を低減させるためには冷却速度を上げることが必要である。このため、Fig. 7 (a)に示すように厚み1/8 inch (3 mm) の鋼の鋳型に鋳込み、一定速度で水冷するBucket Castingが開発されたが、鋳型に接触したアルミニウムが凝固収縮して隙間があいて熱伝達が低下する問題があった²⁷⁾。これに対し、ZüblinはFig. 7 (b)に示すような鋳造法を発明した。鋳型側面の片側を開けて、移動式の平板で閉じて垂

直に下げていき、先に凝固した層の上に順次1～2 inch 深さごとに溶湯を注いでいく方法である^{27), 28)}。その後これらの方法を改良した方法が開発された。Fig. 7(c)はZunckelの開発した方法で、底台が下方に移動して長尺のビレットができるようになった²⁹⁾。

Alcoaも1930年頃より従来の鑄鉄の鑄型に鑄込む方法では、インゴットサイズ121×305×508 mm (4.75×12×20 inch) が限界で、生産性を上げるためにインゴットの大型化が要求された。インゴットを大型化すれば粗圧延後で仕上げ圧延前に行う皮むき (Scalping) 工程での切削量も削減できる効果もあった。1930年、Massena工場のW.T. Ennorによって新しいDC鑄造法 (堅型半連続鑄造法) が検討された。1934年、Ennorは底面がない鑄型および移動式の底台を用い、凝固した殻に直接冷却剤をあてることで凝固速度を上げて組織

を微細化する方法を考案した²⁶⁾。この方法は2Sなどの軟らかい合金には適したが、17Sや24Sなどの硬い合金では冷却中に割れが生じることが分かった。工場関係者だけではこの問題が解決できなくなったため、ARLの物理試験部門が共同で取り組むことになり、工場が鑄造速度、水温と水量、鑄型に接する金属の温度、合金成分のデータを集積して、ARLが熱応力解析を進めることで解決できた。1937年末までに、DC鑄造法はAlcoa圧延工場の半数までに適用され、第二次世界大戦中にはすべての高強度合金が、まだ多少の割れは含んでいたが、DC鑄造法で製造されることになった。Ennorの鑄造法は1937年、Alcoa冶金研究者の会合で報告され、Ennorは「Daddy of the DC ingot」と呼ばれた。Fig. 8は1934年に考案したDC鑄造法の概念図と1938年出願の特許に掲載されたDC鑄造法である³⁰⁾。

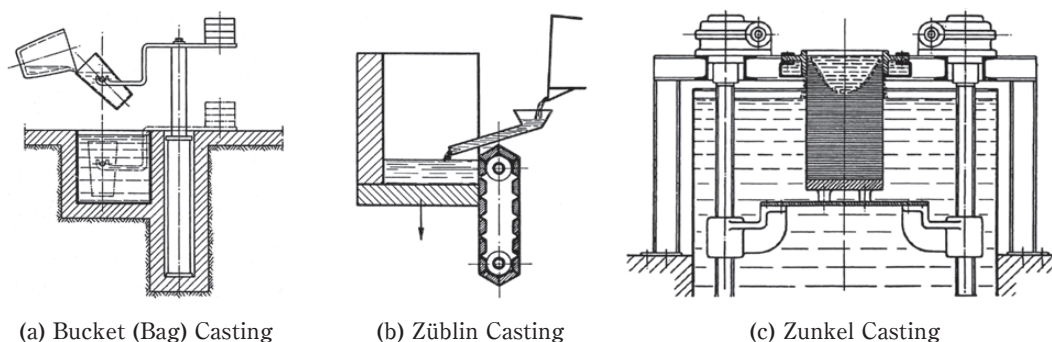


Fig. 7 Development of casting processes²⁷⁾.

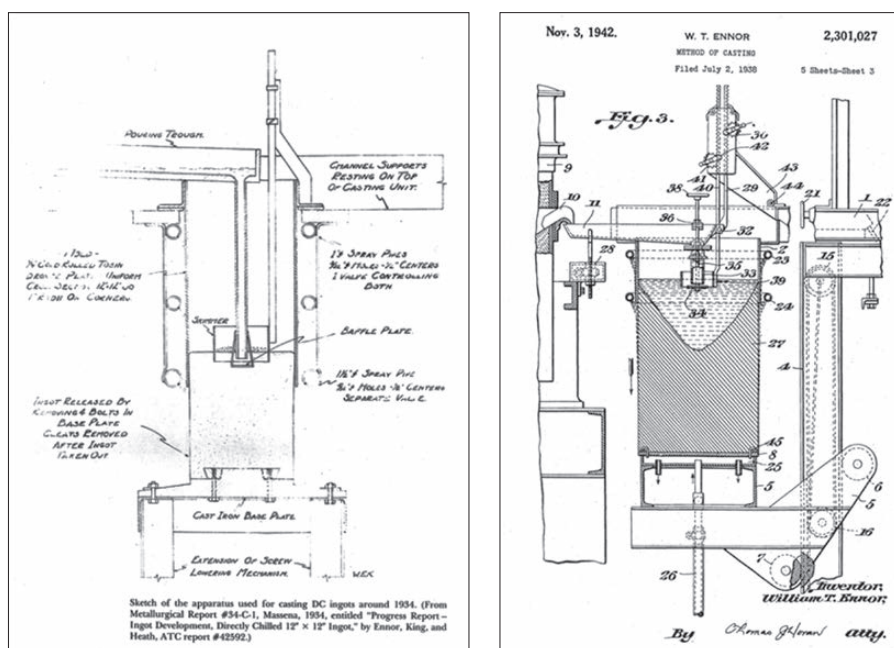


Fig. 8 Invention of the continuous casting process by Ennor in Alcoa. Schematic diagram of the concept (1934)²⁶⁾ (left) and the diagram of the patented equipment (right) (1938)³⁰⁾, the concept diagram is reprinted from reference No.25 with the permission from Alcoa Technical Center.

3.1.4 タンデム圧延技術の導入²⁷⁾

熱間圧延は生産性を上げるためにできるだけ高速で行うことが必要である。このためには最適な圧延温度で製造することが重要であるが、粗圧延時の熱間割れを防ぐために熱間開始時は速度を遅くする必要がある。端面割れを防止するためにVertical edging rollが導入された³¹⁾。通常熱間圧延は、粗圧延機と仕上げ圧延機の2つの圧延機で行われる。当時のジュラルミンの圧延条件は、二段熱間粗圧延機で8 inch厚のスラブを用いて130 ft/minの速度で4 inch厚まで50秒、10パスで圧延し、その後、三段熱間仕上げ圧延機で450 ft/minの速度で、20パス、0.280 inch厚まで150秒で圧延する工程であった²⁷⁾。二段、三段、四段圧延機の生産速度の比較をFig. 9に示す²⁷⁾。四段圧延機の高生産性が高い

ことが分かる。

Fig. 10左に示すようなTrentwoodに導入された当時の最新鋭の熱間圧延機³²⁾は、全部で7台の熱間圧延機(2台の1 stand四段圧延機と1台の5 standタンデム四段圧延機)で構成されている。まず可逆式で5,000馬力のDCモーターで130～450 ft/minの圧延速度が出せる四段の熱間粗圧延機(8 inch→3 inch)がある。その粗圧延機と5 standタンデムの仕上げ熱間圧延機の間と同じタイプの四段中間熱間圧延機(3 inch→1 inch以下)があり、その中間圧延機の前に再加熱工程がある。クラッド材などの皮材の貼り付けもこの間に行われたものと考えられる。最後に5 standタンデム四段仕上げ圧延機で0.100～0.120 inchまで圧延する工程になっている³³⁾。5 standタンデム圧延機のロール速度、厚み、

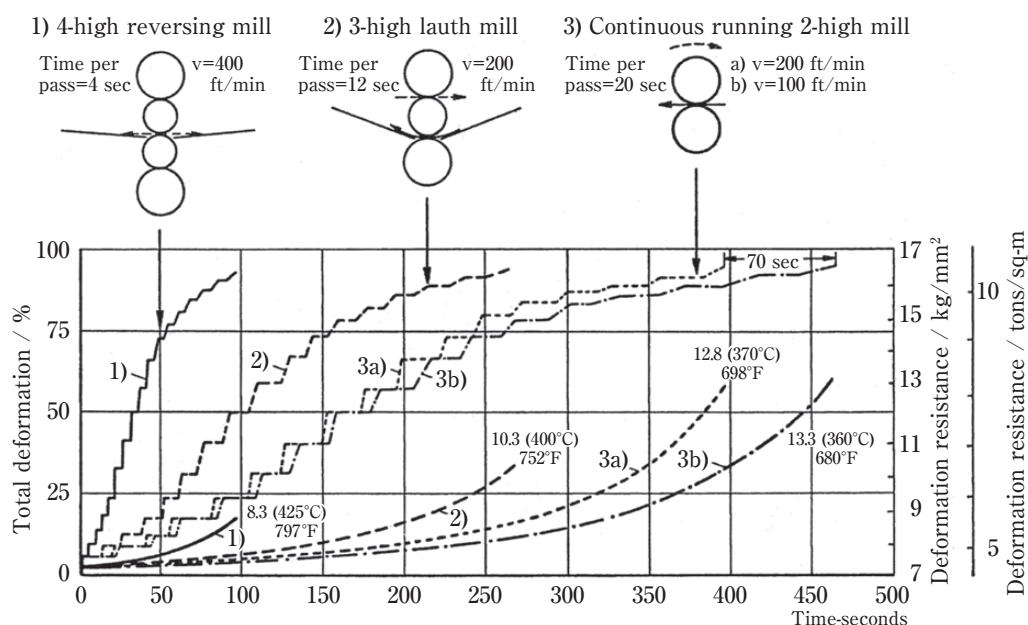
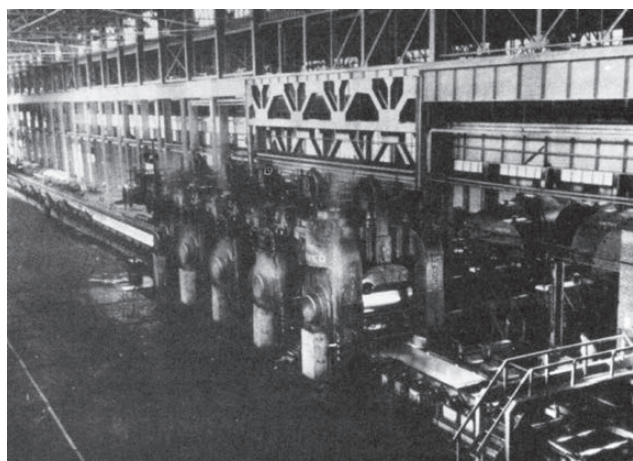


Fig. 9 Comparison of productivity between 2-high, 3-high and 4-high hot rolling mills²⁷⁾.



	1	2	3	4	5
Rolling speeds (ft./min)	364	458	574	610	900
Stock thickness (inch)	.360	.296	.236	.188	.152 .120
Reduction (%)	22	20	20	19	21

Fig. 10 Five stand tandem mills for the hot rolling in Trentwood and their rolling speed^{27), 32)}, left figure was reprinted with the permission from Alcoa Technical Center.

圧下率をFig. 10右に示す²⁷⁾。

このTrentwood工場は政府の国防工場公社DPCが建設し、管理運営をAlcoaに委託したもので、戦後はKaiser Aluminumに払い下げられた。通常の熱間圧延は粗圧延と仕上げ圧延の2台(あるいは粗・仕上げ兼用で1台)であるが、Trentwoodでは7台の熱間圧延機を用い、最初の粗圧延は鑄造組織を壊すことに専念でき、残りの圧延機は生産性の高い、非常に合理的な生産設備となっており、高力系アルミニウム合金の熱間圧延の加工熱処理に最適であると考えられる。従来の圧延機より50倍もの速度で生産できると言われた³³⁾。

3.2 住友の超ジュラルミン、超々ジュラルミンの増産^{34)~37)}

1935年、住友伸銅鋼管(株)は(株)住友製鋼所と合併し、住友金属工業(株)が設立された。同年におけるアルミニウム合金の生産高は1,400トンであったが、後半から国際情勢の緊迫化による航空戦力の大幅増強の必要から飛行機材料の増産が要求された。1937年2月にはプロペラ需要激増による鍛造工場拡充計画が立案された。さらに、陸・海軍による3回の増産計画により、陸軍は7,418トン/年、海軍は4,400トン/年の目標が立てられ、大阪桜島の伸銅所に航空機材料専門の製板課第二工場、管棒課第二工場が建設され、1938~1939年稼動を開始した。1938年末に、海軍航空本部から月産1,364トンのアルミニウム合金生産の要請があり、既定の増産計画の3倍もの要求で、伸銅所には拡張の余裕がなく、新工場の敷地が検討され名古屋に決定した。

1939年国家総動員法の公布で伸銅所軽合金関係工場、プロペラ製造所全工場などが陸海軍共同管理工場となり、管理官が派遣され、生産または修理の業務に関し、陸海軍大臣の指揮監督を受けることになった。1941年9月名古屋軽合金製造所が設置され、1942年2月名古屋軽合金製造所も陸海軍共同管理工場となった。この工場は、当時伸銅所で開発中であった連続鑄造法による大型鑄塊を用いることを前提としたストリップ方式圧延の製板工場であった。

1943年に入ってから工場の整備が急速に進み、板、押出材、鍛造材を製造する総合軽合金工場となり、その生産量は最盛期には月産4,000トンであった。

3.2.1 連続鑄造技術

(1) 住友の自主技術開発

製板技術の発展に伴い、ストリップ方式で圧延を行うためには、高品質でかつ大型鑄塊の必要性が生じてきた。1936年春頃の外国雑誌に、「これからは連続鑄造

法に向かわねばならぬ」という2、3行の記事があり、これに着目したのが佐藤新治氏である。1937年彼は「物事すべて根本は素質である。素質のないものでも努力すれば上手の域に達するが、努力だけでは名人にならない…、しかして、素質のよい鑄塊を作るには連続鑄造法以外にない」という趣旨の報告書を当時の製造部長である丸山五男氏に提出し、許可を得て実験を開始した。その後、名古屋軽合金製造所はアメリカのUnited Engineering社のストリップ方式圧延設備を導入することとなり、製板用角型大型鑄塊を必要としたため、大型鑄塊連続鑄造技術の完成が必須となった。これを担当した鹿子木立郎氏は1941年6月、長さ1,200 mm、約400 kgの鑄塊を製造するSKS-V式と呼ぶ鑄造法を完成させた(Fig. 11)。1942年には、最大1,400 kg、厚さ220 mm、幅600及び800 mm、長さ4,000 mm程度のものが造塊された。実際の圧延には400 kg、600kg鑄塊が用いられたので、一本のスラブから3枚取りまたは2枚取りされた。

当初、Vereinigte Leichtmetallwerke GmbH (VLW 社)の技術導入で製造する予定であったが、古河電工が先に交渉していたため技術導入はできなくなった。このため鹿子木氏は海外の文献や特許を参考に、大型鑄

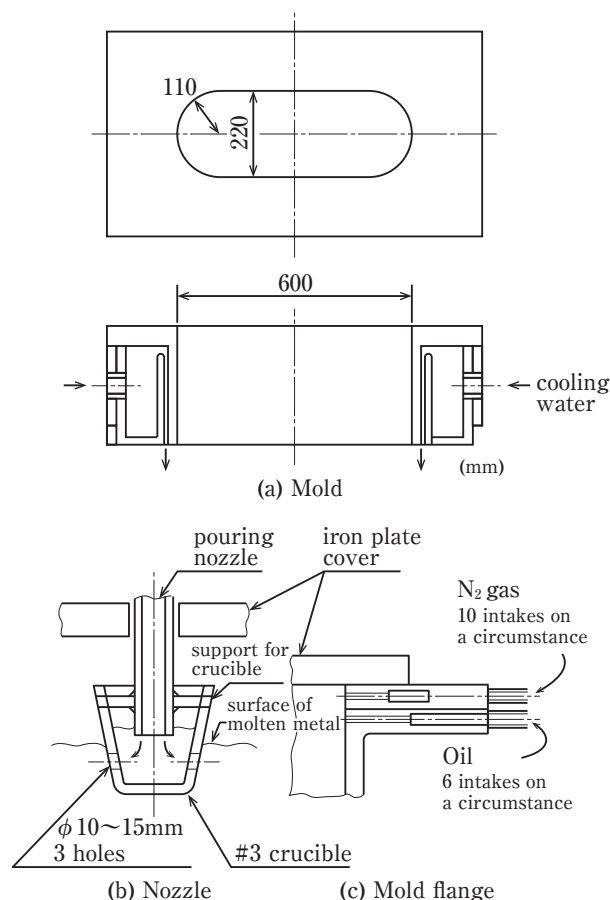


Fig. 11 Continuous casting mold for a slab and its nozzle^{34), 35)}.

塊の製造の実験を行い、1942年名古屋軽合金製造所にて量産化した。この連続鋳造法ではジュラルミン、超ジュラルミンだけで、超々ジュラルミンは鋳込んで放置すると割れるといった問題があり、Züblin法 (SKS-VI式, Fig. 12) が適用された。Züblin法によるESD板用鋳塊は、厚さ120 mm, 幅400 mm, 長さ600 mm (約80 kg) 程度のものであった。

(2) 古河電工のVLWからの技術導入 - 「ベルリンからの手紙」より - ³⁸⁾

古河電工は1937年9月の工場事業管理令に基づいて、日光と大阪の工場が陸海軍の管理を受けるようになった。特に古河は陸軍からの要請で航空機用アルミニウム合金の大量生産のための新工場の建設が必要になった。新工場建設にあたっては外国の最新の技術導入することが不可欠であった。1938年VLWから技術提携の話があり、鋳塊を作る技術ではVLWが優れていると判断し、1939年8月古河とVLWは契約を結び、溶解鋳造、圧延、鍛造、押出、研究に関して技術導入を行い、技術習得のために3年で技術者を3回派遣することとなった。派遣されたのは松尾敏彦、川村知、北島正元の3名で、1941年5月シベリア経由でドイツに向かった。6月にベルリンに着いたが、12日後、ドイツはソ連に対し宣戦布告をした。7月にハノーバーに着き、空襲の最中VLWでの研修、VLWの連続水冷鋳造法などの技術習得を行った。11月にハノーバーを引き上げたが、日米開戦の危機ですぐに帰国することは難しくなった。購入機械類や技術資料は潜水艦で日本に運ばれた。1942年9月帰国手続きをとったが、ソ連を通過するビザが取れず翌年まで持ち越された。1943年の春、

技術資料や駐在員との連絡で日光では連続水冷鋳造設備を作り上げた。その結果、24SはできたがESDは良品ができなかった。1943年10月ようやくソ連通過ビザがおりたが、1社2名までということで北島にはビザは発給されなかった。ひとり残された北島はベルリンの空襲の中、肺をやられて闘病生活となり、陸軍の計らいでドイツ陸軍傷痍 (しょうい) 軍人療養所に入った。戦況が悪化し1945年1月にはスイスの結核療養所に移ったが、9月18日39歳で客死した。これらの経緯について、北島正元氏の長男である北島正和氏が執筆した「ベルリンからの手紙、第二次世界大戦、大空襲下の一技術者」が2005年中央公論事業出版から出版されている。(Fig. 13. 北島の手紙が本の表紙になっている)

3.2.2 圧延技術

(1) 伸銅所 (大阪桜島)

1935年ころから、超ジュラルミンが飛行機の外板材として量産に入って多忙を極めた。そこで桜島の伸銅所に大板を専門とする製板課第二工場が建設される。1938年頃から稼働し、主要設備は圧延機12基であった。大板の生産には、熱間圧延機としてアメリカMesta社製の三段圧延機 ((22 inch, 30 inch) × 66 inch) 1基、冷間圧延機にはUnited Engineering (U.E.) 社製の三段圧延機 ((20 inch, 30 inch) × 66 inch) 1基と二段圧延機 (28 inch × 60 inch) 4基、日立製作所製二段圧延機2基 (28 inch × 61 inch, 28 inch × 66 inch), その他U.E.社製四段帯板圧延機1基を有していた。製板第一工場で「押え圧延」された熱間圧延板を用いて大板が製造された。

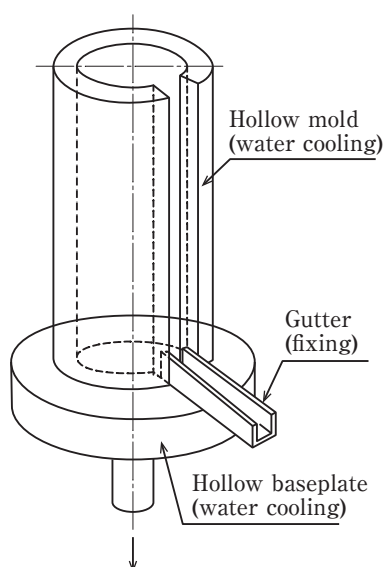


Fig. 12 Züblin casting process for a billet bar ^{34), 35)}

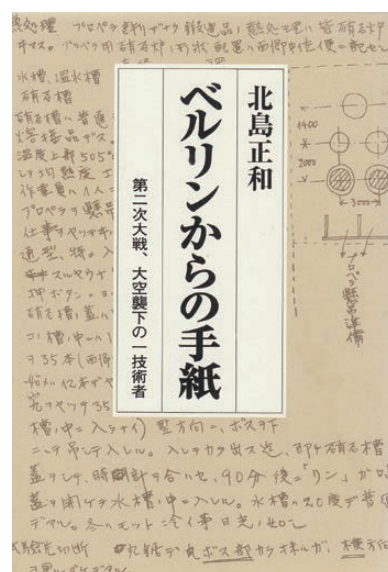


Fig. 13 Front cover of the book "Letters from Berlin" ³⁸⁾

(2) 名古屋軽合金製造所

名古屋軽合金製造所の熱間圧延では連続鋳造法による大型鋳塊を用いたストリップ方式圧延が行われた。この方式では幅1,000 mm板用スラブをU.E.社製可逆式二段圧延機(粗, 仕上げ兼用)で厚さ6 mmまで熱間圧延後、コイルアップする。焼鈍後、冷間粗圧延はU.E.社製2standタンデム四段冷間圧延機で3パス通板し、中間焼鈍を入れて、その後シングルのU.E.社製四段冷間圧延機で圧減率50%の仕上げ圧延を行い、板厚0.5ならびに0.6 mmとした。ストリップ方式で圧延した板はジュラルミン(D2), 超ジュラルミンとその合せ板(SD, SDC)の3種類で、板厚は0.4 ~ 1.2 mm, 幅1,250 mm以下である。超々ジュラルミンESDとESDCは従来の圧延方式であった。可逆式二段熱間圧延での超ジュラルミン合せ板(SDC)の圧延工程は次のようである。粗圧延も仕上げ圧延もこの二段熱間圧延機で行われた。

400kgスラブ(厚さ220 mm, 幅600 ~ 800 mm) → 押え圧延(厚さ135 mm, 幅850 mm) → 面削(片面10 mm) → 洗浄 → 皮板付け → 加熱 → 熱間圧延(厚さ6 mm, 幅1,100 mm) → 両耳切断(幅1,050 mm)

焼入れには硝石炉を使用し、大板はつり下げ方式であるが、小板の場合には寸法によってコイル(最終単重40 ~ 50 kg)のまま焼入れしたこともあった。

1944年におけるアルミニウム合金板材の生産量は伸銅所500 ~ 600トン/月、名古屋軽合金製造所は最盛期には2,000トン/月(内、ストリップ方式が1,500トン/月)であった。

4. おわりに

6回にわたって、ジュラルミンから超々ジュラルミンに至るまでのアルミニウムの技術史をまとめてきたが、そこから見えてきたものを次に述べる。

第1に、戦前までのアルミニウム合金開発の歴史は航空機用それも軍事用と関わってきたことで、国策の一つとして大きな発展を遂げてきたことである。戦後は欧米では民間航空機の発展とともに高強度アルミニウム合金の使用量も増えてきて、航空機用高強度高靱性アルミニウム合金開発は現在も引き続いて行われている。合金開発から見れば、最近の合金は亜鉛量などの添加量も超々ジュラルミンに近づいていて、超々ジュラルミンの先進性は明らかである。しかし残念なことに、現在の日本では航空機産業が欧米に比べて小さく、ボーイング社の機体の製造を請け負っていること

もあり圧倒的に輸入品が多く、国産品は1割程度である。我々にとって問題なのは、缶材や自動車材に比べて市場規模が小さすぎて研究開発ができていないことである。高強度合金開発およびその製造技術に関しては完全に欧米に遅れていると言わざるを得ない。現状のままでは、技術も研究者も育たなくなってくることを懸念する。航空機用合金の開発ができるためには、高度な材料知識のみならず高度な製造技術や品質管理も要求されることで、逆に、航空機材料ができるかどうかはその会社の実力ひいては国力とも関わってくることである。航空機材料の国産化を国は支援推進すべきである。また我々ももっと積極的にユーザーニーズを把握し、海外に真似のできない技術でもって対抗し、市場に受け入れられる材料を開発すべきである。そのことが国産品を増やし、さらには海外にも輸出できる材料となるであろう。

第2に、材料開発はその製造技術の発展が伴わないと工業化できないことを歴史は示している。純アルミニウムからジュラルミン、ジュラルミンから超ジュラルミン、超ジュラルミンから超々ジュラルミンへと移行する過程で、その生産技術の進歩がなければ工業化はできなかったであろう。第一次世界大戦ではドイツが世界をリードし、第二次世界大戦ではアメリカが世界をリードしてきた。特にアメリカでのDC鋳造や5 standタンデム圧延技術の進歩では目覚ましいものがある。しかるに戦前の日本の生産設備はほとんどがドイツやアメリカからの輸入で国産設備が少なかった。これでは生産性でも品質でも勝負にならないことは明らかである。Alcoaも1930年代、各工場の製造技術に材料屋も入れたFabrication Departmentをつくり生産技術を発展させてきた。材料屋は何をどのように作りたいのか明確に提示していくことが重要である。そうすれば現場の製造技術者はきっと応えてくれると思う。もっともその前提として研究と製造の日頃のコミュニケーションが重要である。

第3に、自分の頭で考えることのできる研究者が必要である。24Sがなぜアルコアにできたのか、なぜ住友ではできなかったのか、75Sがなぜアルコアにできなくて、住友にできたのか。24Sの開発に当たっては、AlcoaはJeffriesを招き研究所をつくり、多くの優秀な研究者を集めたことが開発につながったと考えられる。Alcoaの場合、研究者がそれぞれの専門家で基礎研究も重視していたと考えられる。その結果が世界でも標準的なテキストとなって表われている。残念ながら住友ではそこまでの研究体制はできていなかった。しかもドイツ、イギリス、アメリカなど諸外国の研究

結果に影響を受けやすい状況であった。イギリスでジュラルミンの強度でケイ素が重要だというと言った方向に走ってしまい、今一步、これでいいのかと振り返ることができなかったことも24Sの開発ができなかった原因のひとつだと思う。五十嵐博士はむしろ多くの経験的事実を現場から多く学ぶことで、よく観察し、なぜかを繰り返し問い、よく考えて実験の方向を定めて、75Sの開発に成功したものと考えられる。しかし、鑄塊割れや熱間圧延割れが多く、Alcoaのような製造技術に関する専門家が少なく、生産性で苦労したと思う。Alcoaも超々ジュラルミンの発明の直前まで来ていたのではないかと推察されるが、五十嵐博士の観

察に裏付けられた思考力が勝ったと言えよう。自分の頭で考える技術者を育成するには、五十嵐博士が言ったようによく実験事実を観察し、そこから自ら理論(仮説)を構築することが重要である。研究者には得られた結果を研究報告書、特許、学会発表、研究論文、技術資料にしていく作業を義務付けることが必要である。またこれをサポートしていく研究体制も必要である。住友金属の戦前の数多くの残された研究報告書、住友金属工業研究報告、特許、研究論文はこうした研究のあり方を今に示していると言えよう。最後に、元住友軽金属工業(株)副社長、研究開発センター所長であった永田公二博士が収録した五十嵐語録をFig. 14に示す³⁹⁾。

1. 自社の歴史、人、技術等の一切を体得することが第一。
4～5年はかかる。学校の講義だけでは駄目。
2. 理論も実験も日に日に進んでこそ工業も発展する。
未熟な理論を絶対だと考えてもらっては困る。
3. 事実が大切なんだ!あれこれ理屈を言わないこと。
思った結果と矛盾した事実が示されたときのみ進歩があり、発展がある。
4. 疑問を生じたとき、どうしてだ、どうしてこうなるのかなと繰り返し、
徹底的に突っ込んで調べなくては駄目だ。
5. テーマが大事だが、誰がテーマを決めるのか。

Fig. 14 Sayings by Dr. Igarashi³⁹⁾.

- 1) At first, it is necessary to master the Company's history, persons, technology and so on entirely. It takes 4-5 years to master them. It is insufficient to learn only from lectures in schools.
- 2) Industries develop only by the progress of theories and experimental technologies in everyday. It is not correct to consider that an immature theory as absolute.
- 3) Fact is important! Don't make various quibbles. Progression and development are generated when a new fact inconsistent with expected results is found.
- 4) When questions arise, it is necessary to consider in details and repeatedly why they occur and investigate them thoroughly.
- 5) The theme is important. But the problem is who decides the theme.

参考文献

- 1) 佐藤眞住, 藤井清隆: 現代の産業アルミニウム工業, 東洋経済新報社, (1968).
- 2) 中島崇行, 村津寿美男: 産業界シリーズ, アルミ業界, 教育社新書, (1976).
- 3) 日本アルミニウム協会ホームページ: アルミニウムの基礎知識, 世界のアルミ産業より, <https://www.aluminum.or.jp/basic/worldindustry.html>
- 4) H.O. Frøland: ALUMINUM ORE, The political Economy of the Global Bauxite Industry, ed. by R.S. Gendron, M. Ingulstad and E. Storli, UBC Press, Vancouver, (2013), 79-106.
- 5) 清水啓: アルミニウム外史 (上巻), 戦争とアルミニウム, カロス出版, (2004).
- 6) 秋津裕哉: わが国のアルミニウム製錬史にみる企業経営上の諸問題, 建築資料研究社, (1995).
- 7) 森永卓一: アルミニウム製錬, 日刊工業新聞社, (1968).
- 8) 森永卓一: 軽金属, **25** (1975), 30-40.
- 9) 置村忠雄編: 軽金属史, 金属工業調査会, 軽金属協議会, (1947).
- 10) 岩崎廣和: Chemistry & Chemical Industry, **67** (2014), 599-601.
- 11) 西村秀雄: アルミニウム及其合金, 共立社, (1941), 7.
- 12) グループ38: アルミニウム製錬史の断片, カロス出版, (1995).
- 13) 木村仁信編著: 彼方の礫土, ―満洲軽金属・その誕生から終焉まで―, 満洲軽金属製造株式会社, 社友しろかね会, (1996).
- 14) 内野正夫: 軽金属時代, No.372 (1965, 7号), 27-30.
- 15) 森永卓一: 火鍋子, カロス出版, (1965), 「舊満洲國に於ける軽金属工業の實相」, 軽金属時代, (其の1) No.186 ~ (其の9) No.194を集め, その他の海外訪問記と合本したもの. (アルミニウム協会に保管)
- 16) 未理周平: 消えた理想郷―先端コンビナート都市・撫順の成長と「終末」, 丸善プラネット, (2010).
- 17) 高橋恒夫: 鋳物, **58** (1986), 600.
- 18) 森永卓一: デュラルミン, 山海堂出版部, (1943).
- 19) 池野進: アルミ情報, 第363号 (2011), 社団法人高岡アルミニウム懇話会, 10-11. 軽金属学会ホームページ <http://www.jilm.or.jp/society/?mode=content&pid=107>
- 20) 大日方一司: 軽金属時代, No.408, (1968), 2-7.
- 21) 大日方一司: デュラルミン, 朝日科学新報9, 朝日新聞社, (1943).
- 22) 宇野博二: http://www.gakushuin.ac.jp/univ/eco/gakkai/pdf_files/keizai_ronsyuu/contents/1003/1003-25uno.pdf
- 23) B-24 (航空機): https://ja.wikipedia.org/wiki/B-24_%28%E8%88%AA%E7%A9%BA%E6%A9%9F%29
- 24) 柳澤潤: 21世紀のエア・パワー―日本の安全保障を考える, 石津朋之, ウィリアムソン マーレー 共編, 芙蓉書房出版, (2006), 93-130.
- 25) 安藤英彌, 伊吹龍太郎, 嶋田久典, 谷井成章: 軍用機パーフェクトBook, 第二次大戦までの名機508, コスミック出版, (2009).
- 26) M.B.W. Graham and B.H. Pruitt: R&D for Industry, A Century of Technical Innovation at Alcoa, Cambridge, (1990).
- 27) A. Zeerleder: The Technology of Light Metals, Elsevier Publishing Company, (1949).
- 28) US Patent 1734786, (1929), Züblin.
- 29) DR Patent 678534, (1939), filed 1935, Zunckel.
- 30) US Patent 2301027, (1942), filed 1938, Ennor.
- 31) J. Alden: Nonferrous Rolling Practice, Institute of Metal Division, Symposium Series, Vol.2 edited by D.K. Crampton, (1948), 129-151.
- 32) G.D. Smith: From Monopoly to Competition, The Transformation of Alcoa, 1888-1986, Cambridge University Press, (1988).
- 33) <https://news.google.com/newspapers?nid=1314&dat=19450113&id=h3RWAAAIBAJ&sjid=k-QDAAAIBAJ&pg=4368,2651394&hl=ja>
- 34) 竹内勝治: アルミニウム合金展伸材 ―その誕生から半世紀―, 軽金属溶接構造協会, (1986).
- 35) 竹内勝治: 技術の歩み, 住友軽金属工業株式会社, (1995).
- 36) 吉田英雄: 住友軽金属技報, **54** (2013), 264-326.
- 37) 住友軽金属年表 (平成元年版), 住友軽金属工業株式会社, (1989).
- 38) 北島正和: ベルリンからの手紙, 第二次大戦, 大空襲下の一技術者, 中央公論事業出版, (2005).
- 39) 永田公二: 軽金属, **60** (2010), 192-201.



吉田 英雄 (Hideo Yoshida)
超々ジュラルミン研究所, 博士 (工学),
(元) (株) UACJ R&D センター 顧問