世界文化遺産、韮山反射炉の 10 大ミステリーを解く

工学博士　菅野 利猛，（株）木村鋳造所

World Cultural Heritage—Solving 10 mysteries of Nirayama Reverberatory Furnace

Toshitake Kanno, Kimura Chuzosho Co., LTD.

キーワード：韮山反射炉、世界遺産、大砲、鋳鉄，銑鉄、溶解温度，鞴，燃料，耐火煉瓦

Key-Words: Nirayama reverberatory furnace, World Heritage, Cannon, Cast iron, Pig iron, Melting temperature, Bellows, Fuel, Firebrick

1. はじめに

韮山反射炉は､静岡県の伊豆半島の伊豆の国市にある。図 1 に示すように、高さ 15.6ｍの連双 2 基、合計 4 炉の反射炉である [1)]。現存する反射炉としては、他に山口県萩市の反射炉があるが、実際に鋳鉄の溶解が行われた反射炉としては世界に唯一残された反射炉である。平成 25 年 9 月 17 日に「明治日本の産業革命遺産　九州・山口と関連地域」の構成資産として、年に 1 件選ばれる平成 27 年度の日本推薦世界遺産に決定した。

今回の世界遺産申請は､韮山反射炉単独ではなく、「九州・山口の近代化産業遺産群」の一員としての登録を目指す。構成としては、8 エリア、11 サイト、23 遺産から成る。これらは山口の萩・鹿児島の集成館・伊豆の韮山反射炉・釜石の橋野高炉・佐賀の三重津海軍所跡・長崎の軍艦島や旧グラバー邸･三池炭鉱･八幡製鐵所である。鋳鉄が溶けたかどうかで反射炉の価値を議論する人もいるが､そう云う問題ではなく、「近代産業のアジアへの波及」という、人類史において世界的に重要な遺産としての存在を、後世に残すための申請になる。2015 年 5 月 4 日にユネスコの諮問機関であるイコモスより世界文化遺産に登録するようにとの勧告がなされた。2015 年 7 月 5 日、登録が決定した。

世界遺産登録にとって重要なのは、その資産の周辺住民の保存への協力と登録へ向けての盛り上がりである。そんなこともあり、2013 年 2 月 24 日の韮山反射炉世界遺産シンポジウムの時に､キュポラによる大砲づくりと、アクセサリー等を作る子供鋳物教室を行った。図 2 にも示したが、ナニワ炉機の村田社長の協力により、野外でのキュポラ溶解を行うことができた。その後も、子供鋳物教室は年数回 40 人程度の子供達を集めて行っている。

韮山の反射炉に私が初めて関わったのは､20 年前の平成 9 年の 7 月頃であった。鋳物の大家である真殿先生と恩師である早稲田大学の中江教授から、「韮山の反射炉にセメント製の大砲が置いてあるけど、あれはまずいよ！」と云う話がスタートであった。木村鋳造所は翌年 3 月に鋳鉄製の 24 ポンドカノン砲を鋳造し、伊豆の国市に寄贈した。私が本格的に韮山反射炉の調査を、家族ぐるみで始めるようになったのは、2004 年頃からである。あれから 13 年､図 3 にも示したように､幼かった子供たちも大きくなり、長女・長男は社会人になり、次男・次女は大学生になった。大砲づくりのきっかけとなった中江先生は､その後平成 24 年 4 月に国立科学博物館の主任調査員になり、幕末から明治にかけての鋳鉄製大砲について鋳造工学的立場から、詳細な研究を日本銃砲史学会と共に行うこととなった。

図 1　韮山の反射炉と 24 ポンドカノン砲

図 2　ナニワ炉機さんのキュポラ（※1）と子供鋳物教室の風景

※1 キュポラ：コークスの燃焼熱を利用して、チルしない鋳鉄の溶湯を得るための炉。日本に最初にできたのは長崎製鉄である。原理的には高炉と同じ原理で溶解を行う。日本独自の炉である「こしき」もコークスが石炭や木炭に変わっただけで原理は同じである。「こしき炉」は米などを蒸す土器の「甑」と類似した形なので、そこから名前が来ている。よく「たたら」と「こしき」が混同して使われるが、両者は別物であり、形が全く異なる。日本刀などの原料になる玉鋼などをつくる炉が「たたら」である。

本稿では、現在著者の勤務する㈱木村鋳造所の顧問として活躍されている中江先生の大砲に関する研究と、著者らの韮山反射炉に関する研究を織り交ぜながら、韮山反射炉の大砲鋳造の、時代を超えたミステリーの謎解きについて記す。

図 3　子供たちと下田梨本の登り窯（※2）

※2 登り窯:登り窯は傾斜地に窯を階段状に造るのが特色で、下からまきを燃やし、熱、煙、灰を上の窯へ順送りしてゆく構造となっている。日本では江戸初期（1610 年頃）から始まり、初期伊万里などが有名である。現代でも約 1200～1250℃で焼くことが多い。この温度は、炭素の高い鋳鉄の溶解温度 1153℃よりも 50～100℃高い。梨本の登り窯周辺にはアルミナ質の白色粘土が多く見られ、この粘土を使って耐火煉瓦を焼いたと考えられる。

2. 反射炉とは何か

2.1 金属と鋳物の歴史

人と金属の最初の出会いは紀元前 5000 から 6000 年頃で、天然の金銀銅を叩いて加工していた[2]。鉄と人の出会いは、隕石が最初であったと考えられる。隕石は、ニッケルを多く含むため鍛造が可能である。エジプトでは、BC3000 年頃の隕石による鉄環首飾りが見つかっている。したがって、金属の最初の加工法は、鍛造ということになる。金属を叩く、すなわち鍛造すると、鉄に含まれていたゴミや不純物は徐々に外部に押し出されるようになる。また、炭素元素も外に排出されるようになる。人類は長期間に渡り、金属を叩いて不純物を除去し、炭素量を調整し、道具や武器を作ることになる。そう言えば、日本刀は世界で最も進化した鍛造製品である。

金属を溶かして鋳型に流し込み、凝固させる鋳造の技術は、紀元前 3600 年ごろ、メソポタミアで始まった。今から約 5600 年前のことで、青銅を溶かして、型に流し込んだのが始まりとされている[3]。これが青銅器文明の始まりであり、すなわち鋳物の始まりでもある。そのように考えると、鋳物の歴史は 5600 年ということになる。

図 4 に紀元前 1500 年頃のエジプトのパピルスに、足踏み「ふいご」（※3）で風を送りながら扉を鋳造している様子が描かれている[4]。人類は、「ふいご」の発明により、より高い温度を得ることになり、青銅器時代が全盛を迎えることになる。ちなみに、青銅の融点は Cu-25%Sn で約 800℃であるために、鋳込みを考えると、溶解温度は 900～1000℃を超えていた可能性がある。

※3 ふいご：小規模の炉に使用される手動又は足動式の簡単な送風機。

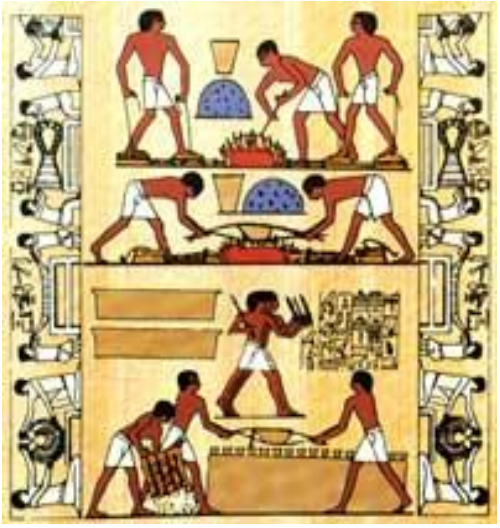


図 4　青銅扉の鋳造（BC1500 頃）（エジプト）[4]

地球上では、鉄は酸化しているために、還元をしないと鉄として使えない。鉄鉱石の還元を行い、多くの鉄を手に入れたのは、紀元前 1700 年頃のヒッタイト王国だと言われている。砂鉄などを木炭で還元するバッチ式の炉を用い、炉底に溜まった海綿状の純鉄に近い鉄を取り出し、この鉄を加熱鍛造することによって鉄器を得ていたようである。紀元前 8 世紀頃のホメロスの叙事詩には、鉄が非常に高価であることが書かれている。おそらく、鉄は金の 5～10 倍の価格であったと考えられる。鉄は、金や青銅と異なり、錆びやすい欠点を有している。このため、鉄の歴史的な遺物は錆びて土に還ってしまうため、あまり残っていない。鉄を作る技術は、「トロイの木馬」や「アキレス」で有名なトロイ戦争で、紀元前 1200 年頃にヒッタイトが敗れることにより、ヨーロッパ全土に広がることとなる。

不思議なことにヨーロッパでは、叩いてつくる鉄の生産が 14 世紀になるまで行われ、鉄を溶かして鋳型に鋳込む鋳造は 14 世紀以降になるまで行われない。サーベルがヨーロッパの武器なのも、この鉄の作り方の歴史の差によるものではないかと考えられる。

青銅ではなく、溶けた鉄を鋳型に流し込んで鋳造する技術は、中国で紀元前 7 世紀頃最初に開発される[5]。中国の青銅器技術は「ふいご」を使ってかなりな高温を達成していたと考えられており、この技術の流れから炭素含有量の高い鉄（一般的には炭素が 2.1%以上のものを鋳鉄と呼ぶ）を溶解して種々の道具を作ったと考えられる。

炭素の低い鉄が溶ける温度は1536℃と高いが、炭素の高い鉄（鋳鉄）は、溶ける温度が約1153℃と低く、湯流れ性も良いことから鉄（鋳鉄）の鋳造が可能となった。紀元前4世紀頃の中国の鋳鉄は、2.5～4.3%C、0.1～0.2%Si、0.01～0.2%Mn、0.1～0.5%P、0.01～0.1%S 程度の成分である[3]。シリコン（Si）量が日本製の鋳鉄（0.1%以下）よりも高いことからも高温を得られていたと推察できる。この組成の鋳鉄はシリコンが低いために、チルと呼ばれる黒鉛のない硬くて脆い材料となる。

このチルと呼ばれる鋳鉄は、硬くて脆いために、加工ができないという最大の欠点を有している。現代の加工機でも、チル鋳物を加工することは困難である。図5に硬くて脆いチル鋳物の組織写真を示す。このチル鋳物はほとんど黒鉛が出ていないため、風鈴のように良い音がする。それに対して、図6に示した現代の加工できる鋳鉄には、片状の黒鉛が出ているために、音の振動を吸収する能力が高い。現代の加工できる鋳鉄で風鈴を作ったとしても、音はほとんど出ない。この振動吸収性が良いことを利用して、現代の鋳鉄は工作機械や産業機械のベース材として使われている。

中国では、このチルした鋳物（図5の鋳鉄）を、約900～1000℃の酸化鉄内で3日間加熱することにより、図7に示す白心可鍛鋳鉄をBC470年頃には作製していたようである[6]。三国志の時代に使われていた曹操の「百辟刀」や諸葛孔明の「神刀」などは、この可鍛鋳鉄を熱処理（※5）及び鍛造して炭素量調整し、作ったものとも推察できる。1637年に出版された産業技術書の天工開物によれば紀元前2～3世紀頃の漢の時代には図8に示すように、1784年にヘンリー・コートが発明する反射炉を使ったパドル法で作られる錬鉄を、すでに製造していたことがわかる[7]。この図から、中国では「ふいご」を使って「こしき」のような高炉で、かなりな高温の溶湯を得ていたことが想像できる。歴史的には、1772年にフランスのレオミュールによって白心可鍛鋳鉄（図7の黒鉛がない現在の鋼に近い鉄）は発明されたことになっている。また黒心可鍛鋳鉄（図9）は1826年にアメリカのボイデンによって製造されるようになる[8]。現代でも、稀に可鍛鋳鉄が使われることもあるが、1948年にモローによって発明された球状黒鉛鋳鉄（図10）によって、可鍛鋳鉄の生産量は減ってゆく。ちなみに、著者が世界遺産である富岡製紙場にあったとされる明治村のブリューナーエンジンを調査してみると、伸びが必要な部品には、可鍛鋳鉄が使われていた。

中国の鉄の歴史は、青銅からチル鋳物、その後熱処理による可鍛鋳鉄、錬鉄へと変化することになる。

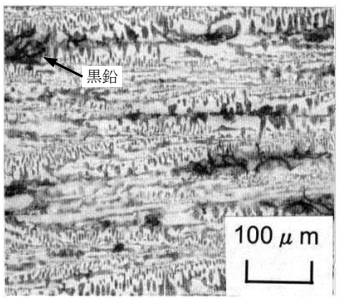


図5　硬くて脆い昔のチル鋳物（※4）の組織

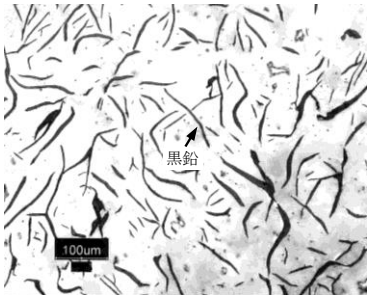


図6　現代の加工できる鋳鉄の組織

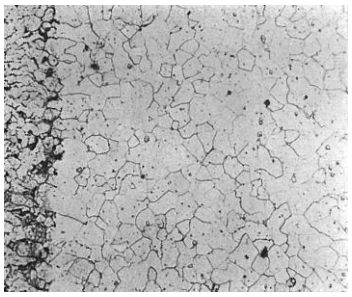


図7　チル鋳物から作られる鋼と同じ組織をした白心可鍛鋳鉄[7]

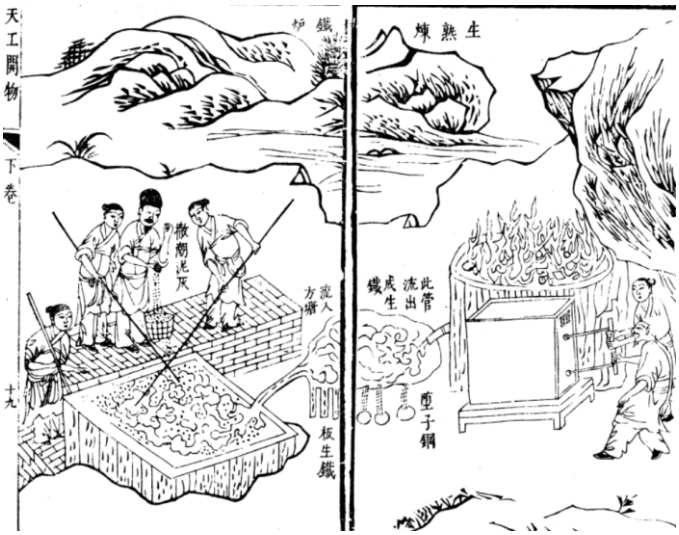


図8　　銑鉄・錬鉄の製錬炉[7]

※4 チル鋳物：チル（Chill）の語源には冷す、寒くするという意味がある。鋳物では冷し金（Chiller）を当てて溶湯の冷える速度を調整するが、この時に冷える速度が速すぎると黒鉛の出ないチル鋳物となり、鋳物は不良になる。このような経験から冷し金を使ったところがチルすることが多かったために、その部分をチルと呼ぶようになったと考えられる。いずれにしてもシリコン（Si）がある程度入っているか、もしくは炭素の高い鋳鉄でないとチルした鋳物になってしまう。チルした鋳物は硬くて削れない。

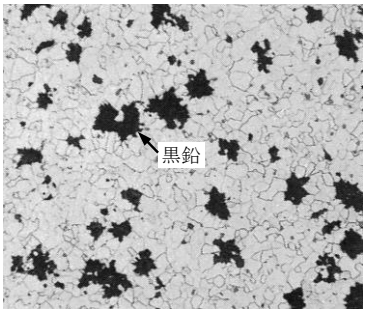


図 9　チル鋳物から熱処理で作られる黒心可鍛鋳鉄の組織 [9)]

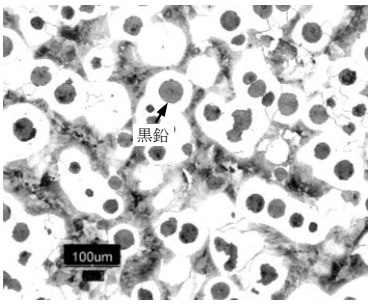


図 10　現代の球状黒鉛鋳鉄

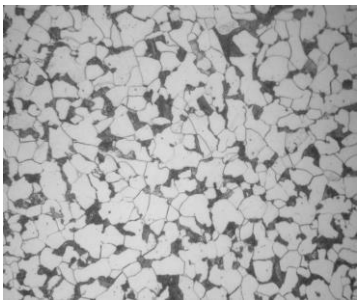


図 11　鋼の組織（S25C）

※5 熱処理：溶融点以下の温度で鉄鋼および非鉄金属材料に所要の加熱と冷却の操作を与え、目的とする性質を得る処理 [23)]。レオミュールは熱処理によってチル鋳物から鋼のような鉄を作る技術を開発した。

鉄の鋳造技術が、ヨーロッパに 14 世紀まで伝わらなかったのは、このチルした鋳鉄の脆さに原因があったと考えられる。よって、ヨーロッパでは紀元前 7 世紀から産業革命の 18 世紀まで、鋳鉄は硬くて脆いものであったことになる。日本でも、高炉ができる前の江戸末期までは、チル鋳物が主体であった。ヨーロッパや日本で、粘さがあり、焼き入れで硬くできる、叩いて作る鍛造品の鉄が重宝されたこともうなずける。中国はその間に、加工できないチル鋳物を熱処理することにより可鍛鋳鉄を製造し、鋼（図 11）に近い材料を手に入れていたことになる。また天工開物によれば「ふいご」を使った高炉のようなもので錬鉄も作っていたと思われる。

鋳鉄の性質を大きく変えたのは、シリコン（Si）含有量の増加である。シリコンの高い、チル組織がない鋳鉄が出来るのは、1779 年のイギリスで作られたアイアン・ブリッジの頃である（図 12）。イギリスでは、1735 年にダービ 2 世が高炉で鋳鉄を製造することに成功し、シリコンの高い鋳鉄が製造できるようになった。チルしない鋳鉄の出現により、鋳鉄は始めて加工できるようになり、この鋳鉄により蒸気機関が製造可能になり、産業革命が起こることになる。そのような意味では、鋳鉄は産業革命の母であり、現代では産業を支える重要な素材である。

以上をまとめると、鉄には、①叩いて作る鉄、②硬くて脆いチルした鋳物、③その硬くて脆いチル鋳物を熱処理で柔らかくした鋳物、④中国のように「ふいご」を使って高温を得て作った錬鉄と呼ばれる鉄の 4 種類があったことが分かる。

金属の歴史を、酸化物の還元と云う観点で見てゆくと、興味あるいくつかの事に気づく。図 13 に酸化物の安定度と温度の関係を示したグラフを示す。

図 12　世界文化遺産に登録されているチルでない片状黒鉛鋳鉄製の橋（アイアン・ブリッジ）1779 年　イギリス

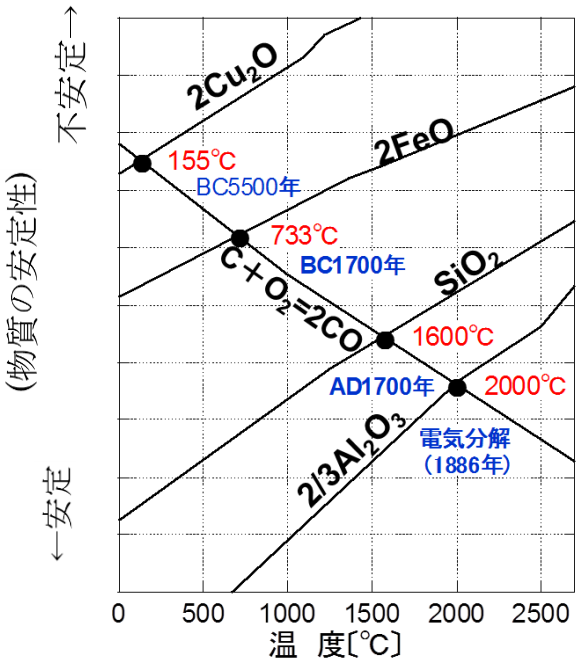


図 13　酸化物の安定度と温度の関係

図 13 のグラフを見ると全ての物質は、温度が上がると、原子の振動が大きくなるために不安定になる。温度の上昇に伴い氷から水、そして水蒸気へと変化するのと同じである。しかしながら、一酸化炭素（CO ガス）だけはこの宇宙の法則から離れて、温度が上昇するにつれて安定となる。高温になればより安定する特殊な物質である。一酸化炭素が存在したおかげで、人類が生まれ、酸化した金属を還元して文明が生まれることになる。図 13 は、例えば銅の例で説明すると、酸化銅を炭（炭素）の中に入れて 155℃以上すなわち焚き火程度の温度にすると、酸化銅は銅に還元されることを意味する。図 13 より、還元できる温度が低い金属ほど、歴史的に古くから使われるようになった事が分かる。チルしない鋳物をつくるにはシリコンが必要なことを前述したが、SiO_2を多く含む珪石からシリコンが取り出せるようになったのは、1600℃以上の温度が得られる高炉ができた AD1700 年以後の事である。このように考えると、人類の文明は温度との戦いであったとも言える。

2.2 反射炉の歴史的位置づけ

前述したように、イギリスでダービ 2 世が高炉により、シリコンの高い加工できる鋳鉄製造を可能にしたのは 1735 年である。ダービ 2 世がつくった加工できる鋳鉄は蒸気機関の最も重要な材料となり、この蒸気機関は、高炉に強い風を送る手段となり、高炉で高い温度を得られるようになった。可鍛鋳鉄では大物や肉厚物の製品は出来なかったが、加工できるチルしない鋳物ができるようになったことがポイントとなる。高炉の発明から転炉ができるまでが鋳鉄全盛の時代である。反射炉は高炉の発明より遅れて、1766 年にクラネージ兄弟によって発明される。この発明は反射炉の燃料に石炭を用い、高炉からつくられた銑鉄（※6）（鋳鉄）を再溶解する技術である。この発明により、高炉から独立して大量の鋳鉄溶湯を手に入れることができるようになった。低温の銅や鉛などを溶かす反射炉は以前から使用されており、反射炉そのものを発明したのが 1766 年でないことに注意をしたい。その後 1772 年にレオミュールによって、チル鋳物を熱処理してつくる白心可鍛鋳鉄（現在の鋼のような鉄）が発明される。1784 年にはヘンリー・コートが、反射炉の湯をかき混ぜ（パドル法）炭素量を少なくして、鋼（錬鉄）を作る方法を発明する。錬鉄は炭素量が 0～0.25%と低い鋼である。その作り方は、まず反射炉内に酸化鉄を入れ、溶解した銑鉄と酸化鉄の反応（$FeO + C \rightarrow Fe + CO\uparrow$）により、銑鉄の炭素量を下げ、棒により溶湯をかき混ぜながら鋼のボールをつくり、これを鍛造して鋼を作る方法である。このため反射炉でつくる錬鉄には、ノロ（※7）などから入る介在物が 10～20%残ると云う欠点がある。パドル法で 1 回につくることができる鋼（錬鉄）は、約 200kg 程度である。1889 年の万国博覧会で建てられたエッフェル塔は、この錬鉄でつくられている。エッフェル塔の鉄骨重量は 7,000 トンであることから、一大事業であったことが分かる。ちなみに東京タワーは 4,000 トン、スカイツリーは地上部のみで 36,000 トンである。前述したように、中国では紀元前 2～3 世紀の漢の時代にパドル法で錬鉄をつくっている。多くの文献には鉄がパドル法を使って反射炉で出来たと単純に書かれることが多い。反射炉は、初期は①銅や鉛の低融点物の溶解、中期は②高炉からの銑鉄を使っての再溶解、後期は③パドル法による錬鉄の製造と云う遍歴を経ることになる。（表 1）。

表 1　反射炉の歴史的位置づけ

		年度	炉と材質	発明者	内容・歴史的意義
鋳鉄の時代（約 50 年）		1735 年	高炉・鋳鉄	ダービ 2 世	シリコン（Si）の高い加工できる鋳鉄製造を可能にした。
	反射炉の時代（約 90 年）	1766 年	反射炉・鋳鉄	クラネージ兄弟	高炉を使って作られた銑鉄（※6）を反射炉で再溶解することにより、高炉から独立して大量の鋳鉄溶湯を得ることが可能になった。
		1722 年	白心可鍛鋳鉄	レオミュール	加工できないチル鋳物を熱処理により鋼のようにした鉄
					反射炉の湯をかき混ぜることにより（パドル法）、炭素

※7 ノロ（スラグ）：溶解材料の錆や溶け出した耐火物などから発生する異物。鉄より軽いので溶湯の上に浮上する。溶湯を空気を触れさせないために、生石灰等を使って、故意に作ることもある。韮山反射炉でも石炭やカキ殻を注文している。韮山反射炉ではノロを出す出滓口と溶湯を出す出湯口があることから、ノロを出滓口から出した後に、黒鉛等を浮かべ、その後溶湯を出した可能性がある。

鋳物の歴史で説明した、叩いてつくる鋼ではなく、直接溶湯から炭素が 2.1%以下の鋼が直接つくられるようになるのは、1856 年のベッセマー転炉の発明からである。ちなみに、2014 年に世界遺産になった、富岡製紙場で使われていたブリューナーエンジンの伸びを必要とする部品の材料の一部は、著者が調査した結果では可鍛鋳鉄であった。

イギリスの産業革命期における反射炉は、ダービ 2 世の高炉による鋳鉄の製造から転炉による鋼の生産という時代の流れのなかで、高炉から独立して鋳鉄を溶かす炉、錬鉄という鋼をつくるための炉と変化していったことになる。ちなみに、チルしていない鋳鉄を熱処理しても可鍛鋳鉄にはならない。ヨーロッパで大砲の鋳造に反射炉が用いられたのは、高炉からチルしないシリコンの高い銑鉄が手に入れられたこと、大量の溶湯を手に入れるのに当時としては反射炉が最も適していたこと、反射炉で炭素を 4.3%から 3.2%程度まで下げて強度のある鋳物がつくれたことなどが主原因と考えられる。反射炉において炭素を下げることは一種の精錬ではあるが、転炉で不純物を除去するような精錬のイメージではないことに注意を要する。

3. 韮山の反射炉で鋳鉄製の大砲は製造できたか？

3.1 韮山反射炉の構造から考える

図 14 に韮山反射炉の構造を示す。韮山反射炉は、煙突高さ 15.6 m、幅 5.0 × 6.0 m の双連炉 2 基、合計 4 炉及び深さ 2.7 m の鋳台を有した炉である。ロストルと呼ばれる部分に、木炭や石炭もしくはコークスなどの燃料をおいて、燃焼させる構造である。鋳口と呼ばれる部分に、溶解材料（韮山の反射炉では、こしきであらかじめ作成した 10 cm ×10 cm × 1 m の溶解材料を用いていた）を挿入し、これを反射炉の熱により溶かす。溶けた溶鉄は、ノロと共に傾斜した出湯口付近に溜まる構造になっている。この溶湯を方孔と呼ばれる穴から撹拌棒で撹拌して、溶湯温度を均一にすると共に、ノロと溶湯の分離を促進させている。後述するように、初期に完成した南炉では、溶解材料の付近に輻射熱が集中する構造となっているが、後で完成した北炉では、溶湯に熱が集中する構造となっている。煙突の底部は、岬と呼ばれる凸に狭くなった形状となっており、熱は逃げないが、圧力差によりベンチュリー効果が発生し、より強力な自然通風が可能なようになっている。

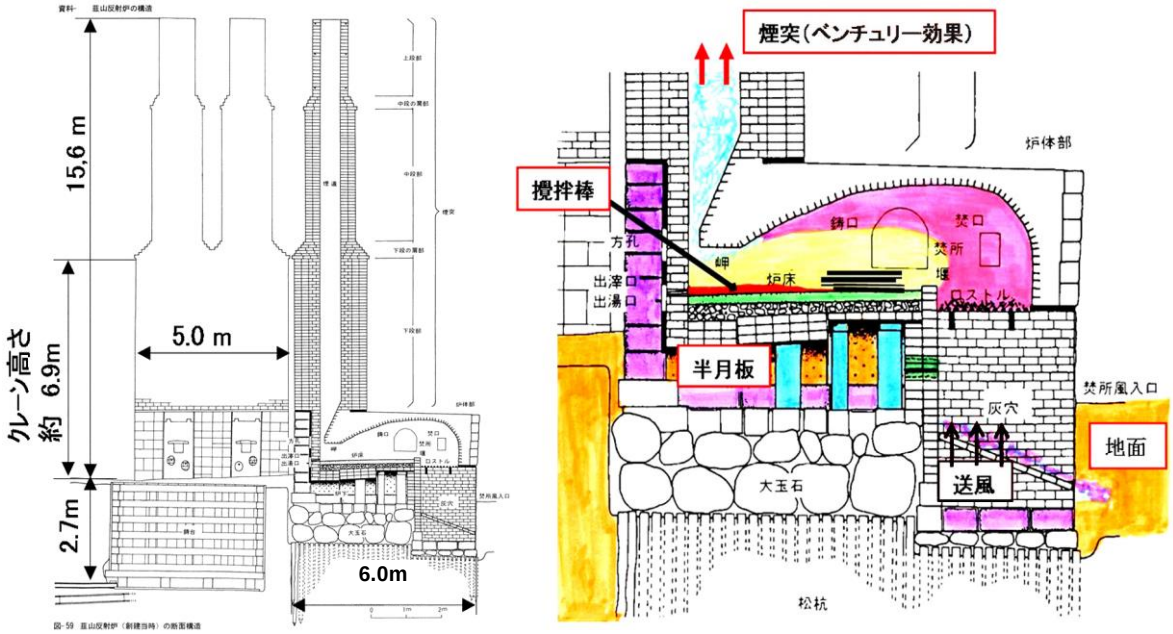


図 14 韮山反射炉の構造 [1)]

韮山反射炉に残された謎について、整理したものを表2に示す。一般説については、明確な表現を強いて避けたものが多く、どちらとも取れる表現をした文献が多い。これらの謎について、文献と実験結果を参考にしながら考察を加えてゆく。

表2　韮山反射炉に残された謎と一般説

	韮山反射炉に残された謎	一般説
溶解関係	①韮山反射炉で鋳鉄の湯は溶けたか？	鉄が溶ける温度は1600℃なので、韮山反射炉では鉄が溶ける温度に達しなかった。
	②反射炉の溶解温度は？	
	③反射炉の溶解時間は？	燃料が木炭なので、長時間かかった。
	④鋳込み方法は直接湯を入れる直注か？取鍋（※8）に一度受けて鋳込んだか？	シャチ台があることからクレーンで吊って取鍋で鋳込んだ。
	⑤「ふいご」は用いられたか？	煙突のベンチュリー効果により、風が入るので「ふいご」は使わなかった。
	⑥溶解燃料は？コークスは使われたか？	コークスは使わなかった。
	⑦溶解材料は？岩見の砂鉄・岩手の岩鉄（鉄鉱石）・輸入銑（南蛮鉄（※9））・バラスト	佐賀藩（※10）では船の底に敷くバラストを用いたが、韮山では用いなかった。
煉瓦	⑧反射炉の煉瓦はどこで焼いたか？	河津梨本と韮山の裏山
その他	⑨韮山反射炉での大砲の鋳込み数と完成品の数	鉄製は2門／青銅含めて128門。
	⑩鋳鉄製の大砲の成分の問題	Tiや Sなどの不純物が多かった。温度が上がらなかった。

韮山反射炉を見た多くの人が、こんなちっぽけな、簡単な炉で鉄が溶けるものかと思われるかも知れない。そのイメージから、鉄は溶けなかったとする人も多い。まず、溶かすのは融点1536℃の鉄ではなく、炭素が4.3%程度以上入った融点1153℃の鋳鉄であることを頭に入れておく必要がある。凝固温度が1153℃の成分の鋳鉄であるならば、溶解温度は100℃高い1250℃程度で十分である。煉瓦を焼くのに使われた登り窯の温度は1200～1250℃であることを考えると、登り窯よりも若干高い程度の温度である。

図15にヒュゲーニンの書いた大砲鋳造法に記されている反射炉図を示すが、炉床の角度が大砲鋳造法の方がきつくなっていること及び反射炉下部が空洞になっていないことを除いて、岬の存在や炉の形状はほぼ韮山の反射炉と一致している。

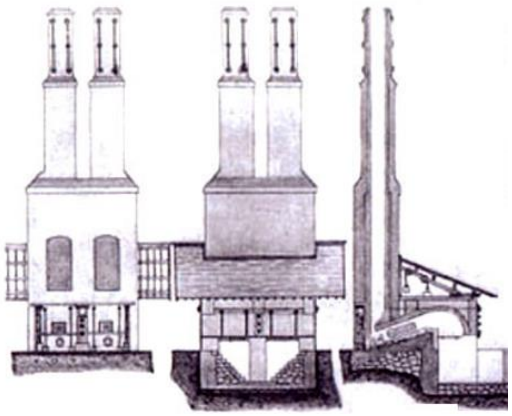


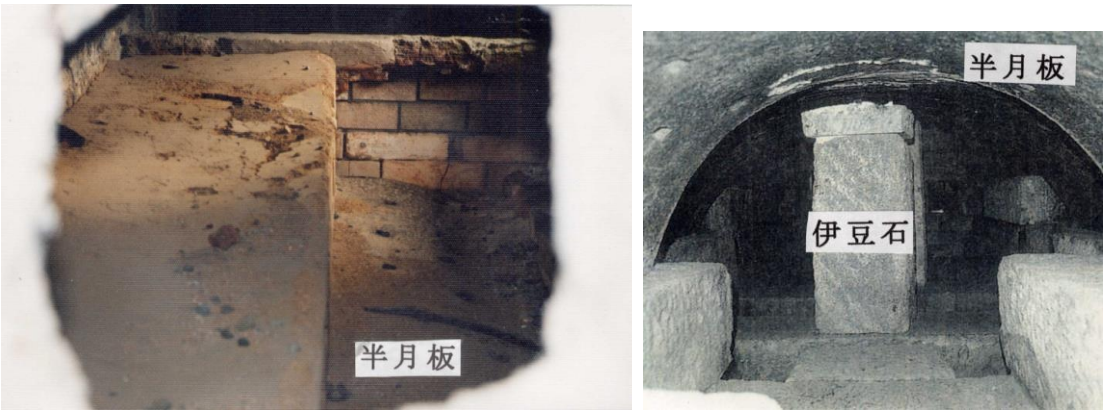
図15　大砲鋳造法に記された反射炉
（国立国会図書館所蔵）

図16　焚所風入口

※8 取鍋：溶湯を出湯口から鋳型への運ぶための耐熱性の容器。鋳造品の大きさにより、柄のついたひしゃくのような物から、台車やクレーンで運ぶ物まで様々な形がある。出湯口から直接鋳型に流し込む場合と比較して、一旦取鍋に受けてから鋳込むと、溶湯の温度が約100℃下がる。

※9 南蛮鉄：戦国時代（16世紀頃）、刀や銃砲の需要から鉄が不足したため、ポルトガル人を通じて輸入されたインド産の鉄。バラストと共によく用いられていたと云われる。しかしながら調べてみると、Siが低いために、加工ができないチル鋳物であった。

※10 佐賀藩：九州北西部にあった藩。十代藩主だった鍋島直正は、海外の科学技術の導入に積極的で蘭方医学や洋式兵学を奨励した。ヒュゲーニンの『大砲鋳造法』の翻訳を命じ、国内初の反射炉建造と鉄製大砲の鋳造を成し遂げた。佐賀藩の大砲は信頼性が高く、幕府が大量発注を出した。彼らの高い技術力は日本の海防策に大きな影響を与えた。



反射炉で鋳造された反射炉鋳鉄材料の成分、%

鉄材名	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ti
半月鉄	3.5	0.016	-	-	0.026	-	0.003
まぐさ鉄板	4.2	0.02	-	0.14	0.014	-	0.008

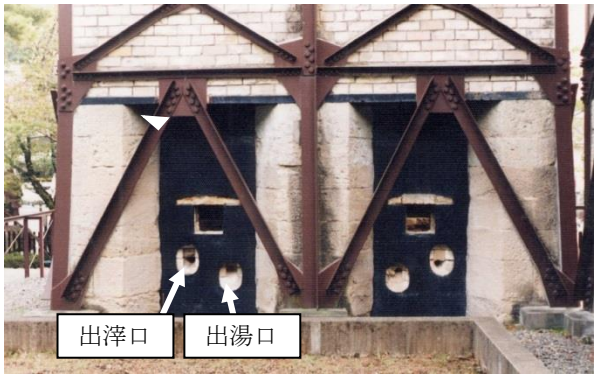
図 17　半月板と伊豆石 [1)]

図 18　鋳口と焚口の様子

図 19　反射炉内の様子 [1)]

焚所風入口は、風が入る場所である（図 16)。煙突のベンチュリー効果により、かなりの風が焚所入口から入ることになる。この場所や反射炉の至る所にレンガに〇印が付いたものがあるが、このレンガが下田の梨本で焼かれて、下田の反射炉で使用され、後から韮山へ運ばれたものである。焚所入口のロストル部の鋳鉄製の棒はかなり曲がっていることから、高温になっていたことがうかがえる。

反射炉の下部は半円の半月板で丸くなっており、この半月板を伊豆石が支えている（図 17)。半月板には四角の穴が開けられており、炉床から出る水分が溶湯に入らないで、下部から逃がす構造になっている。この構造は、ヒュゲーニンの大砲鋳造法には記されておらず、韮山独自の考案と思われる。



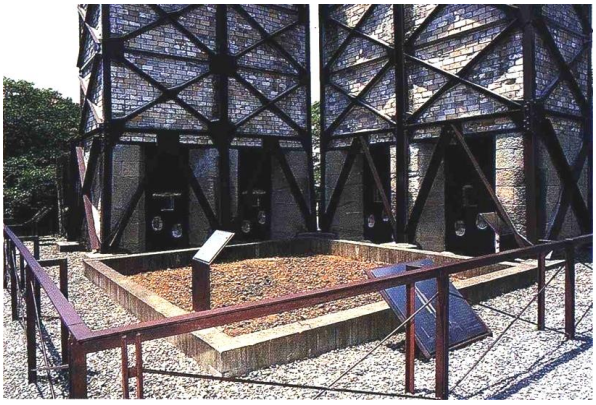


図 20　出湯・出滓口の様子

燃料を入れる焚口はあまり大きくないが、「こしき」でつくった鋳鉄を入れる鋳口は異常に大きい（図 18）。最初から全溶湯材料を炉内に入れて溶解したとされているが、それにしては鋳口が大きいことは謎である。

内部は登り窯と同じようにガラス状のコーティングがされている。これは明らかに輻射熱の反射を目的としていると思われる。出滓口はノロを出す穴であり、出湯口は湯を出す穴である（図 19）。方孔と呼ばれる穴は、ノロと溶湯をかき回すためのものである。パドル法から溶湯の精錬を行ったとする記述もあるが、不純物を除くような精錬は行われなかったと著者は考えている。まして、後述する炭素 4.3%以上の鋳鉄ならば、精錬は必要ではない。

外側から見ると方孔と出滓口、出湯口が見える（図 20）。また出湯口の直前には鋳型を据え付ける鋳台がある。鋳台と出湯口が接近していることより、出湯口から直接溶湯を注いだものと考えられる。鋳台の謎については後述する。

3.2 韮山反射炉の稼働記録から考える

表 3 に、韮山反射炉築造記録（以下反射炉日記と呼ぶ）からの抜粋記事を示す [1]。反射炉日記から、鋳鉄製の 18 ポンドカノン砲を少なくとも 3 砲は鋳造していたことが分かる。また、石炭 60 トン、天城炭一万俵（煉瓦製作分を含む）、ノロを軟化させる除滓剤である石灰や蠣（かき）殻なども注文している。溶解材料としては、銑鉄 43 トン、鉄 13.7 トン（18 ポンド砲約 12 挺分）、銅 2700 kg、錫 270 kg（ちょうど錫を 10%含む青銅となる配合）を注文している。鉄関係の注文量が圧倒的に多いことから考えて、韮山反射炉が鋳鉄を溶かす目的で作られた炉であることは間違いない。また、反射炉日記からは、銑鉄に問題はあったが、少なくとも 1 門の鋳鉄製大砲の試射まで行っていることが読みとれる。

反射炉日記からは、下田の反射炉建設場所にペリー艦船の外人が侵入したことや、それにより韮山に場所を変更したことがわかる。また、佐賀藩の杉谷らが来るまでは、南炉でチル鋳物で十分な大砲鋳造のための金枠などを鋳造している。佐賀藩が来た後、佐賀藩の力を借りて 9 月 9 日に南炉で初めて 18 ポンド砲を鋳込んでいる。佐賀藩の協力を得ることがどうしても必要であったと推察できる。この 1 番 18 ポンド砲は 12 月 4 日に加工を開始する。2 月 17 日まで続いた事が記されているものの、その後の状況については記されていない。恐らく、大砲としては何らかの問題があったものと考えられる。1 番砲を鋳込んだ南炉に関しては、後述する韮山高校生の研究からも分かるように、熱が溶湯ではなく溶解材料に集中していた問題がある。

安政 5 年の 2 月 22 日に北炉で鋳造された 3 番目 18 ポンド砲では、後述する鋳鉄の湯面模様で見られる亀甲模様（※11）と同じ名称の亀甲銑（※12）が 300 貫（1125kg）使われている（図 21）。溶解量が 4870kg なので 23%の亀甲銑が使われていることになる。これに対して、安政 4 年 11 月 7 日の溶解では大砲の鋳込みでないためか、亀甲銑の記述は見られない。亀甲模様が見られるようになるためには、著者らの湯面模様の研究では、シリコン値は 0.5%以上なくてはならない [10]。また、炭素の多い過共晶鋳鉄でもシリコンが低ければ湯面模様は現れない。よって、亀甲銑はシリコンを含んだ銑鉄であったことが十分に考えられる。図 22 に示す良い鋳鉄溶湯に現れる亀甲の模様と、江川家所蔵の溶解日記に示される亀甲銑の名称が一致する事は、単なる偶然とは考え辛い。亀甲銑を使った 2 月 22 日の 3 番目 18 ポンド砲は試打を行っているので、韮山反射炉では少なくとも 1 台の鋳鉄製大砲が完成したことになる。ただし、試打なので火薬の量は半分程度であったと思われる。以上より、少なくとも 1 台の大砲は確実に試打まで行ったと判断できる。3 番鋳込みの 18 ポンド砲の加工時間を反射炉日記から考察すると、2 月晦日（2 月 30 日）に廃頭（押湯）（※13）の切断を行い、試射を 3 月 13 日に行っている。この日程から考えると 3 番鋳込みの加工日数は 14 日以下と云うことになる。逆に 1 番 18 ポンド砲は、12 月 4 日に加工を開始し、2 月 17 日まで要していることから、73 日も加工していたことになる。恐らく、後述する亀甲銑を使用しなかったため、部分的にチルしていたものと考えられる。

佐賀藩は、オランダから購入した電流丸のバラスト（※14）を使って大砲の鋳造に成功したとされている。バラストとは、当時は高いマストをもった帆船であるために、船のバランスを取るために船底に重しとして用いた銑鉄の事である。西洋の港を出るときはバラストを船底に敷き、帰る時にはバラストの代わりに荷物を積んだとも云われている。

※11 亀甲模様：鋳鉄溶湯表面に現れる模様。溶湯の表面に酸化被膜
とにより種々の模様が生まれる。湯面模様の発生と種類には温度、
くから溶湯性状の判定に使われていた。著者の実験結果では、湯面
以上の Si、SiO_2 被膜発生、適量の C 量の四点である。笹の葉、麻の
ち六角形の模様は亀の甲羅と似ているために、日本ではキッコウ模

表 3 韮山反射炉築造記録からの抜

四月六日	反射炉
四月九日	常磐岩
四月十七日	土台
同	払
〔中村韮山〕	
五月二九日	御用
六月四日	廻送
七月二五日	石灰
注文	
七月十八日	耐火
七月二二日	板鉄
八月	前板
八月十四日	板鉄
九月十七日	左官
十一月四日	安政
	（反射

亀甲銑

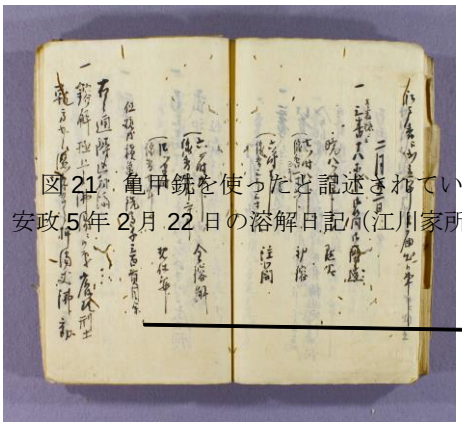
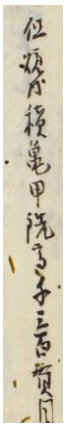
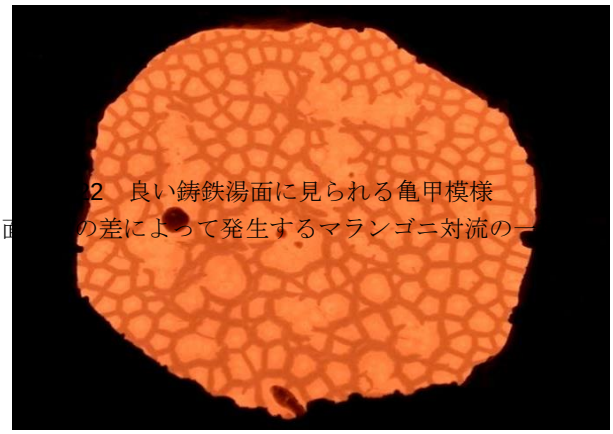


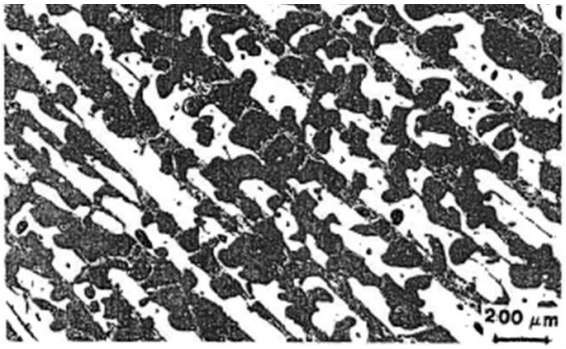
図 21　亀甲銑を使ったと記述されている
安政 5 年 2 月 22 日の溶解日記(江川家所蔵)





2　良い鋳鉄湯面に見られる亀甲模様
（表面　の差によって発生するマランゴニ対流の一

(a)　大砲の組織



(b)　バラストの組織

図 23　1770 年オーストリア沿岸で難破した船の大砲とバラスト(※14)の分析値 [11)]

※12 亀甲銑：江川家所蔵の溶解日記に記述されている溶解材料。上記の亀甲模様と名称が一致することから、溶解するとキッコウ、つまり六角形の模様が現れる銑鉄ではないかと思われる。この銑鉄が使用された 3 番目の 18 ポンド砲は、加工・試打まで行われている。

※13 押湯：溶湯は凝固過程で大きく収縮するため、製品と同じ容積の湯で鋳込むと表面又は内部に空洞ができてしまう。これを防ぐため、空洞ができると予想される部分の上に、プール（押湯）のように溶湯を溜めておく。押湯は製品部よりも凝固が遅くなるよう大きく作られる。凝固が進むにつれて、製品部が収縮して湯が足りなくなるが、押湯から湯が補充されるようにする。この大砲作りにおいても、押湯が用いられている。

※14 バラスト：当時の船は原則的に帆船であったため、バランスを取るために鉄製のバラストを船底に積み込んでいた。佐賀藩は、外国から買った電流丸のバラストを使用して大砲を造ったとする説があるが、バラストの語源が「価値のない」からも分かるように、シリコン（Si）の高い銑鉄をバラストに使うことは通常はなかったと思われる。また、電流丸のバラストのみでは、多くの大砲をつくることはできない矛盾も残る。

このバラストについて調査した 1980 年の海外文献によると、図 23 に示すように船（かの有名なキャプテン・クックの船 [11)]）に積まれていた大砲のシリコンは 0.5%であり、片状黒鉛鋳鉄となっているが、この船に積まれていたバラストのシリコンは 0.01%と少なく、チル組織となっている [12)]。明らかに大砲を作るための鉄源とバラスト用の鉄源に違いがある。

バラストと共に、よく用いられたと云われる南蛮鉄については、東京都立産業技術センターの佐藤健二さんが

分析を行っている[13]。表 4 にその分析結果を示すが、どの南蛮鉄も Si 値が低い。

佐賀藩のバラスト説については、佐賀藩が多数の鋳鉄製大砲を作ったことからも説明できないとする説は多い[14]。また、日本製の大砲がほとんど残っていないことから考えると、やはり後述する炭素の高い過共晶鋳鉄説は有力な説と云える。

表 4　南蛮鉄の化学組成、%[13]

	C	Si	Mn	P	S
小判形	1.60	0.080	0.009	0.076	0.003
細條形・甲	1.58	0.016	0.017	0.011	trace
表面側・乙	0.49	0.038	trace	0.037	0.002
太條形左	0.06	0.070	trace	0.101	trace

これらの事実から推察すると、シリコンの高い銑鉄を得るためには、やはり高炉で作られた銑鉄を使用するしかなかったと考えられる。ヒュゲーニンの大砲鋳造法にも明確に、高炉の銑鉄を使って反射炉で溶解することが記されていることから、当時の人々は高炉銑が必要なことは十分理解していたものと考えられる。反射炉日記に「長崎溶鉱炉の銑鉄を使用すれば､西洋通りの大砲可能。ただし､・・・」と記されているのは、この事を十分理解していた証拠である。そうなると、亀甲銑がいかなる銑鉄であったのかが、最大のミステリーである。

安政 6 年以後は、主として青銅製の大砲が作られるようになる。これは、従来の球形の玉を使う大砲に対して、ロケットタイプの玉を使うライフルカノン砲に時代が変化していったことが理由のひとつとして考えられる。

3.3 シリコンを含まなくてもチルしない鋳鉄を製造する増田安治郎の方法

江戸時代の大砲の中には、シリコンが低くてもチルを出さないで、加工できる大砲をつくる技術形態が存在したと思われる証拠が有る。図 24 に示したのは、川口の鋳物師増田安治郎の作と云われる、幕末の安乗神社の鋳鉄製大砲とその組織である。この鋳鉄は、炭素の高い過共晶と云われる成分より出来ている。シリコンが少なくても、炭素を 4.5%程度まで高くすることにより、チルしない鋳物をつくることができるのである。現代の鋳造技術者のほとんどは、この事実を知らないが、当時の鋳物師は、この事を知っていたと思われる。組織写真には、溶湯から最初に直接発生するキッシュ黒鉛と呼ばれる粗大な黒鉛が見られる。

C4.48%-Si0.13%-Mn<0.001%-P0.117%-S0.034%- Ti0.005%（増田安治郎作）

図 24　安乗神社の鋳鉄製大砲とその組織（中江先生提供）

図 25 に著者らの実験例を示す。この図は、現代のシリコンの高い加工できる鋳鉄（黒丸）と、その溶湯にテルル（Te）と云う元素を添加させてチルさせた鋳鉄の凝固完了温度が、炭素量を増すとどのように変化するかを見たものである。炭素（C）量が 4.3%を越えると同時にチル鋳物は無くなり、加工出来る現代の鋳鉄に変化することがわかる。このことからも炭素 4.3%以上の鋳鉄になると加工できる鋳鉄になることは明白である[15]。

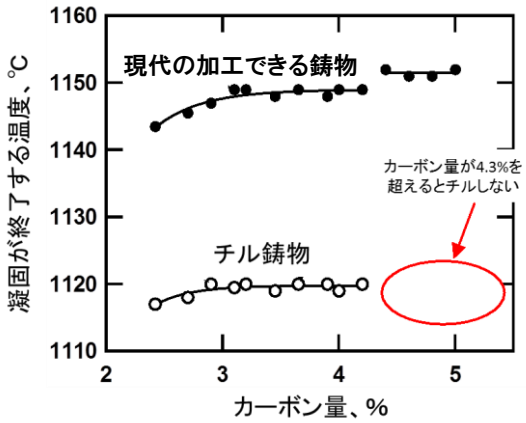


図 25　炭素量とチル鋳物[15]

これは、炭素の多い過共晶成分（※15）では、温度が下がって来て最初に溶湯から出て来るのが黒鉛であり、この黒鉛を核として片状の黒鉛が成長できるためにチルとな

らない。これに対して炭素 4.3%以下になると、凝固の最初に出て来るのが鉄そのもの（専門用語では初晶オーステナイトと呼ぶ）であるため、チル鋳物になってしまう。表 5 に 1590 年から 1840 年までの日本に残された鋳鉄鋳物の成分例を示す。この表より、参考として示した外国製の鋳物は日本製よりもシリコン（Si）が高く、チルしていない鋳鉄であることが分かる。日本の鋳鉄はシリコンが 0.1%以下になっており、成分的にもカーボンが共晶成分（C4.3%）付近の鋳鉄が多いことが分かる。その中でカーボンが過共晶成分である 4.3%を超えているものは粗大な片状黒鉛（図 24 のキッシュ黒鉛）となっており、加工できる鋳鉄となっている。これらの日本の古い鋳鉄製品の成分から判断すると、この時代においては鋳鉄を過共晶成分にしてチル化させないことは周知の事実であったと思われる。

安乗神社の大砲を作ったとされる増田安治郎は、大橋によれば 213 門の大砲（鉄製は 9 門）と 41,323 発の砲弾を鋳造し、巨万の富を得たとされている[16]。また増田安治郎は高島秋帆から高い信頼を得ていたことも知られている。この増田安治郎の過共晶鋳鉄の製造法が佐賀藩や韮山反射炉の大砲に使われていた可能性は非常に高い。また、図 26 に鉄に炭素が混じっていた場合の凝固開始温度を示すが、炭素量が増すにつれ凝固開始温度は下がり、炭素 4.3%では 1153℃まで下がることになる。17 世紀から 18 世紀の日本の鋳物が共晶成分に近いのは、低い温度で溶解できることを知っていたためと推察できる。また、炭素 4.3%以上のチルしない鋳物の存在も十分に知っていた可能性も高い。青銅も、銅に錫を混ぜることにより、固まる温度を下げて、結果として溶解すべき温度を下げている。ちなみに 1153℃より 100℃高い 1250℃で溶解保持し、カーボンを湯面上に敷き詰めると、黒鉛の溶解度線より炭素は自然に 4.5%になる。シリコンが入手できない状況で、加工可能な鋳鉄を製造するには、この方法しかないと考えられる。

表 5　鋳鉄鋳物の成分[3]

No.	鋳造品名	製作年	鋳造場所	化学分析成分、%					鋳鉄の種類
				C	Si	Mn	P	S	
1	竹虎燈炉	1591 年	京都	4.35 ~ 4.47	0.05 ~ 0.06	-	0.23 ~ 0.24	0.020	過共晶の粗大片状黒鉛鋳鉄
2	茶湯釜	1600 年代	京都	4.30	0.03	0.002	0.204	0.027	チル鋳物
3	茶湯釜	1700 年代	京都	4.17	0.07	0.014	0.191	0.019	チル鋳物
4	茶湯釜	1800 年代	京都	4.30	0.04	0.025	0.279	0.020	チル鋳物
5	鳥居	1839 年	奈良	4.57	0.05	0.006	0.240	0.025	過共晶の粗大片状黒鉛鋳
参考	IRON BRIDGE	17							加工できる鋳
	カノン砲（東京）	182							加工できる鋳

※15 過共晶鋳鉄：カーボンが 4
ル化しない。逆にカーボンが 4
なってしまう。カーボン 4.3%

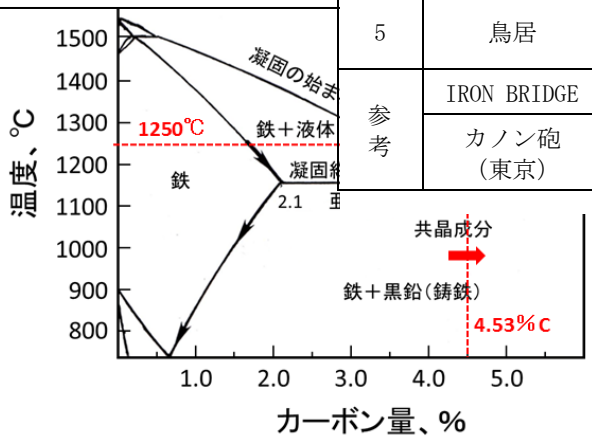
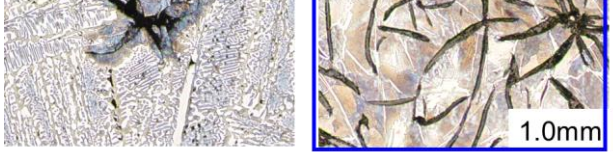


図 26　鉄の炭素量と凝固温度



(a)C4.31%　　(b)C4.53%

図 27　鋳鉄の組織

図 27 に、1250℃で黒鉛を敷き詰めて保持しカーボン 4.53%とした時（b）の鋳鉄の組織と、黒鉛を敷き詰めないでカーボンが 4.31%になった時（a）の組織を示す。明らかに 2 つの組織に差があることがわかる。ただし、この過共晶鋳鉄の引張強さは 10kg/mm^2 程度しかなく、本当に大砲として使えたかどうかには疑問が残る。ちなみに著者らの実験ではカーボン量が 4.5%を下回ると肉薄物ではチル傾向が強くなり、4.5%以上になると強度が急激に低下してくる。よって、両者のバランスを取るためには、カーボン 4.5%がベストである。このカーボン量はいみじくも、増田安治郎の成分と一致する。佐賀藩の大砲は成分的には

ちなみに、炭素 3.2%の鋳鉄の強度は 25kg/mm^2 程度である。日本の反射炉でつくられた鋳鉄製の大砲は、強度と衝撃値の低い過共晶鋳鉄であったために、加工と試射までは行えたが、実戦では破裂してしまい残っていない可能性が高い。中江先生の調査でも、確実に日本で製造したと思われる大砲の存在を確認することができなかったことは、この強度の低い大砲が原因であったことを裏付けるものと考えられる。増田安治郎作の大砲の成分を再度見てみると、表 5 の古い鋳鉄（Si 約 0.05%）に比べて、Si 値が 0.13%と若干高いことがわかる。前述したように韮山反射炉では、3 番鋳込みの 18 ポンド砲において亀甲銑が 23%使われてい

る。亀甲銑のシリコン値を亀甲の模様が出る 0.5%とすると、(0.5%×0.23) ＋ (0.05%×0.77) ＝0.15%となり、シリコン値は 0.15%となる。この値は増田安治郎の大砲のシリコン値とほぼ一致する。増田安治郎も亀甲銑の存在を知っており、これを使った可能性は高いと考えられる。

図 28 に著者らの実験室でつくった過共晶鋳鉄の組織写真の例を示す。この組織は安乗神社の組織写真と酷似しており、隕石などに見られるウッドマンステッテン状の板状炭化物が見られる。

3.4 反射炉の溶解時間

佐賀藩及び韮山の反射炉日記より、反射炉の溶解時間について考察した。江戸時代の時間は、日の出から日の入りまでの昼間と日の入りから日の出までの夜をそれぞれ 6 等分する、不定時法と呼ばれる時刻制度である。すなわち、夏至では昼の「一つ（一とき)」は 2 時間 38 分になるが、冬至では 1 時間 50 分になる。韮山の反射炉日記には、溶け始めから出銑(湯を出し始める事)までの時間が、5 寸 5 分の線香の本数で示されている。およそ線香 7 本分の時間（約 4～5 時間）である。佐賀藩の反射炉もほぼ同様の時間となっている。佐賀藩の記録が火入れからの時間等が詳

の後材料を投入した後に 2 時間で鋳鉄が溶け始め、溶け始めから出銑開始まで約 2 時間かけて湯を溜めて、その後注湯したものと考えられる。木炭などの火力の弱い燃料は、最も熱量を要する炉の予熱に使われたと推察される。

出銑（湯を出し始める事）から鋳込み完了まで約一時間を要していることから、溶湯はキュポラのように連続的に出てくるものであったとも考えられる。鋳造の一般常識的には、湯を溜めて短時間で鋳込まないと、湯境（※16）などの問題が出ると考えられる。溶湯を溜めることができる反射炉の構造から考えて、ある程度溶湯を溜めて短時間で鋳込んだと考えられる。取鍋に一度湯を受けて処理すると、温度が 100℃程度下がることから、取鍋を使っての注湯は難しい。よって、大砲に直接注湯していたものと考えられる。しかしながら、鋳台から出銑口までの高さは 3m 程度しかなく、18 ポンドカノン砲の長さが 3.5m もあることと矛盾が生じる問題が残る。鋳台はあくまで造型の作業を行う場所であることから、鋳台の周辺はそれより深い 4.5m 程度あったのではないかという疑問と推論が生じる。1988 年の鋳台の発掘調査では、反射炉の出湯口付近に関しては発掘調査が行われていない [1)]。出湯口から直接溶湯を鋳込んだがどうか明確にするためには、出湯口付近の発掘が不

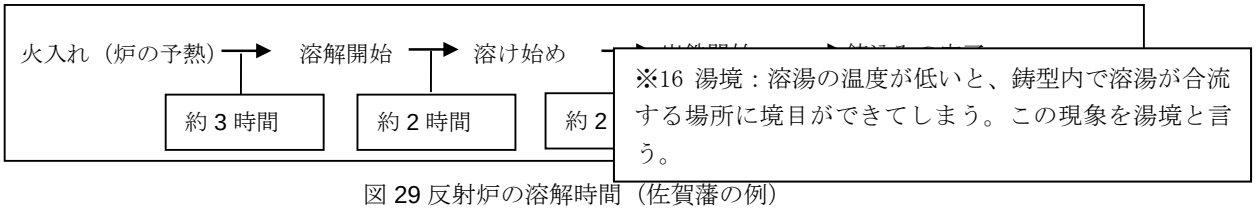


図 29 反射炉の溶解時間（佐賀藩の例）

C 4.53%-Si <0.01%-Mn 0.070%

表 6 実験に用いた溶湯成分 [17]

	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu
佐賀藩 24 ポンドカノン砲の成分	3.22	0.69	0.27	0.27	0.13	0.01	<0.01
シリコンの少ない成分	3.20	0.05	0.30	0.27	0.13	0.01	<0.01

3.

韮山の反射炉において、炉内の温度が何度にまで達したかを推察するには、輻射熱を含む熱解析を行う必要がある。この熱解析は、後日行う予定である。ここでは、鋳鉄の組織となっているシリコン 0.69%の佐賀藩の 24 ポンドカノン砲（アメリカ製との話もある）の成分と韮山反射炉半月板などのシリコン 0.05%を基本として、大砲鋳造に必要な溶解温度及びシリコンの有無による溶湯性状の差について調査した。表 6 に、実験に用いた溶湯成分を示す。

韮山反射炉に使われた、品質が悪いとされる大阪の銑鉄は山陰岩見の砂鉄から作った銑鉄であると考えられる。また、品質の多少良い江戸からの銑鉄が、釜石の岩鉄（比較的純度の高い鉄鉱石の一種である磁鉄鉱）から作ったもの（柔鉄とも呼ぶ）であると考えられる。著者はシリコン量に注目して実験を行った。表 6 に示す佐賀藩の大砲の目標成分になるように溶解し、溶解温度と湯面模様の変化・火花の発生の有無・黒鉛るつぼ（※17）への溶湯の付着度合いなどの関係について調査した。

表 7 に溶湯の湯面模様の変化と 1290℃の時点での黒鉛るつぼなどへの溶湯の付着度合いを示す。シリコンの高い溶湯には湯面模様が見られ、シリコンの少ない溶湯には明確な湯面模様が見られない。また、シリコンの低い溶湯では、高温域で急激な火花の発生が見られると共に、この火花の発生と同時に湯が盛り上り、湯が噴き出しそうになる。このような現象は、佐賀藩の溶解記録にも記録されており、0.7%の溶湯には亀甲状の模様が見られるが、シリコン 0.05%の溶湯には模様は見られず、火花が立っているのが分かる。

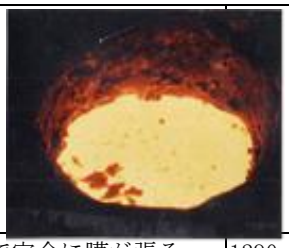
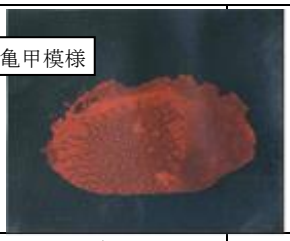
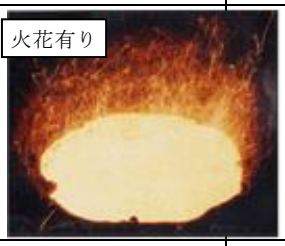
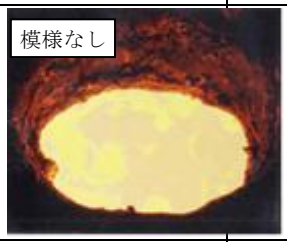
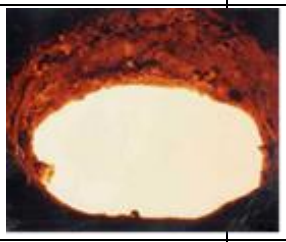
佐賀藩の炭素 3.2%、シリコン 0.7%の成分では、1290℃程度の溶湯から撹拌棒や黒鉛るつぼに湯が付着するようになることから、低くても 1350℃程度の温度が必要となる。佐賀藩の成分から求められる鋳鉄溶湯の凝固開始温度が 1248℃であることから 1280℃程度で湯が撹拌棒に引っ付き始めたものと考えられる。一般的に大物鋳物の鋳込み温度は凝固開始温度より 100℃高くすることから云っても、1350℃が佐賀藩の鋳鉄成分での溶解温度と考えることは妥当性があると考えられる。ただし、奥村・大橋論争で明らかになったように、この佐賀藩の大砲はアメリカ製であるため [14]、1350℃と云う予想温度自体は意味を持たないことになる。

これに対して、もし佐賀藩や韮山反射炉の炭素が共晶成分（炭素 4.3%）以上であったとするならば、凝固開始温度は 1153℃となるため、鋳込み温度は 1250℃で十分になる。

以上より、韮山反射炉における鋳鉄の溶解温度は佐賀藩の反射炉成分（C3.2%）では 1350℃、当時主流であった高炭素（C4.3%以上）では 1250℃と考えることができる。ちなみに、後述する韮山反射炉で発掘された青銅（Cu90%-Sn9%）の切粉の凝固開始温度は約 1028℃であるから、必要な溶解温度は 1120℃以上となる。

※17 黒鉛るつぼ：溶解作業に使用されている、黒鉛でできた耐火性の容器。鋳鉄・軽合金・銅合金等の溶解に使われる。

表 7　シリコン値の違いによる湯面模様（※18）の差

シリコン 0.69%				
	1290℃で完全に膜が張る。	1290～1340℃で亀甲状の湯面模様が見られる。	1400℃で、溶湯の色はオレンジ色を呈している。	1290℃以下では黒鉛るつぼへの溶湯の付着が見られる。
シリコン 0.05%				
	1290℃になると急激な火花の発生が見られる。	1290～1320℃で湯面模様らしきものが現れたが明確でない。	1350℃で、溶湯の色が白色を呈している。	1280℃で、溶湯を撹拌すると鋳鉄が付着してくる。

※18 湯面模様：キュポラや電気炉などで作ったシリコン 0.5%以上、硫黄 0.02%以上の鋳鉄溶湯においては、笹の葉状、麻の葉状、亀甲状の湯面模様が現れる。昔の人は、この模様を見て亀甲状ならば良い溶湯、笹の葉状ならば悪い溶湯と判断してきた。溶解日記の亀甲銑と鋳鉄溶湯の亀甲状の模様が一致するのは、決して偶然だとは思えない。ちなみに、この模様はマランゴニ対流と呼ばれる表面張力の差によって生じる模様である。

を行った南炉と 1857 年 11 月に初吹きを行った北炉の熱エネルギー強度比を示す[18, 19]。南炉は佐賀藩の応援が来る前に完成していた炉であり、北炉は佐賀藩の協力を仰ぎながら建設した炉である。南炉は、溶解材料の部分に熱が集中する構造となっているが、北炉は溶けた溶湯に熱が集中する構造となっている。反射炉本来の意味から言えば、後からできた北炉の熱分布が理想的である。

また、韮山高校の学生は鞴（ふいご）による炎の制御実験を行い、韮山の反射炉では鞴を使用したとする説を提唱している[18, 19]。外部からの通風口が煙突に向かって設置されていたことが明らかになった事から考えても[20]、鞴説を簡単に否定することはできない。

3.7 反射炉全体の様子

反射炉全体の様子を示した古絵図を図 31 に示す。反射炉自体が軍需工場群であったことがわかる。型乾燥小屋があることから考えて、砂に粘土と少量の水を混ぜてつくる生型を焼く、焼き型であったと考えられる。また、こしき炉が見られることより、反射炉建設に用いる材料や反射炉の溶解材料をあらかじめこしき炉で製造していたものと考えられる。多くの文献には「たたら炉」と書かれたものや「こしき炉」と書かれているものがある。たたら炉は玉鋼を作る炉なので鋳鉄を作るには向かない。こしき炉は炭素の高い鋳鉄を作る炉であるから「たたら炉」ではなく「こしき炉」を使って溶解していたと考えるべきである。

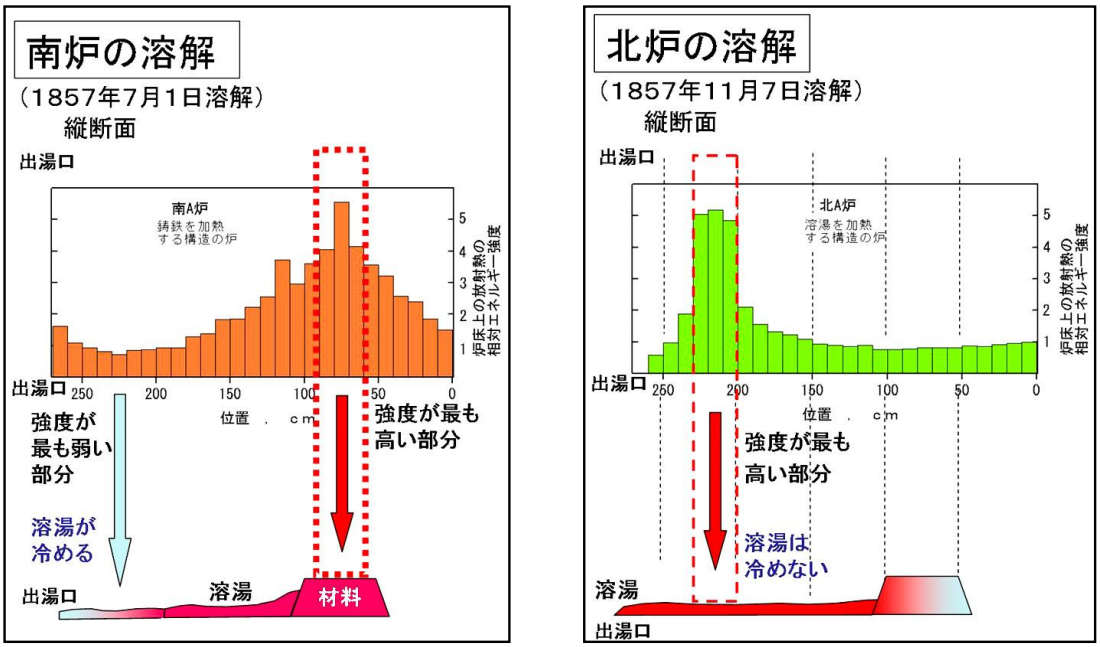


図 30 南炉と北炉における熱強度比の比較[18, 19]

図 31 反射炉の敷地の古絵図[1]

タール製作小屋があることより、石炭からコークスを作っていたことはまず間違いないであろう。コークスの使用については、否定的な意見と肯定的な意見があるが、古絵図から見る限りは、否定する根拠は何処にもない。図 32 に明治 5 年に兵部署に引き渡された頃と思われる反射炉の写真を示す。反射炉の手前にパイプ管のようなものが見える。このパイプ管は江川文庫に残されていた、石炭からタールを作るためのパイプの図面と一致する（図 33）。この写真と江川家の図面より、石炭からコークスをつくる事を目的にタール小屋がつくられ、コークスをつくる副産物としてタールができていたものと考えられる。この時につくったタールは、1855 年に造られた日本で始めての西洋式帆船戸田号に使われたものである。よって、反射炉においては鋳鉄の溶け始めから鋳込み完了までの、熱を多く必要とする時間帯では、コークスが燃料として使われた確率が非常に高い。

また図 32 には、炉の中頃に台が見えることより、クレーンによる取鍋鋳込説が出て来ることになる。古川と呼ばれる川の水を利用して水車を回し、砲身の穴加工を行っていたことがわかる。加工に要した時間は、前述したように 3 番 18 ポンド砲では 14 日以下と考えられる。

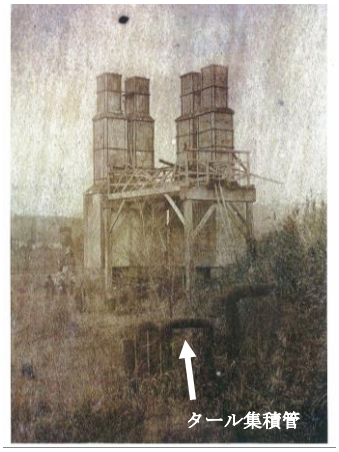


図 32　1872 年（明治 5 年）頃の反射炉（江川家所蔵）

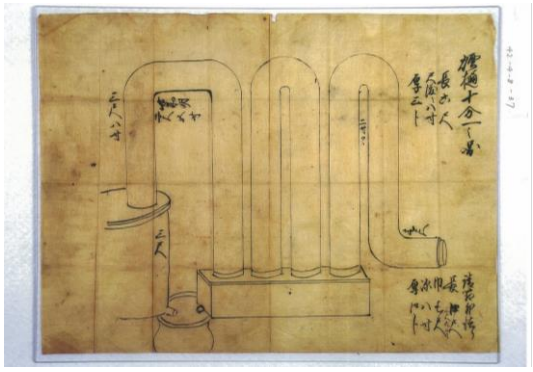
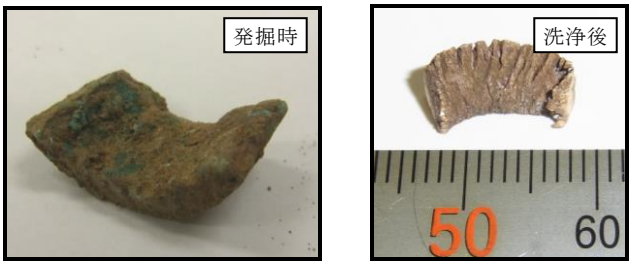


図 33　石炭からコークスをつくる時のタール集積管（江川家所蔵）

2013 年の発掘調査の時に、青銅製の切粉が発見されたので、その結果を図 34 に示す。この青銅の切粉は銅と錫のみからできており、鉛は含まれていない。錫の割合は 10%程度であり、韮山反射炉築造記録で購入した銅 2700kg、錫 270kg と一致する。この切粉より、反射炉日記に記載のように、凝固開始温度約 1020℃の青銅製の大砲を鋳造し、加工していたことが予測される。反射炉日記から、反射炉でつくられた青銅製の大砲は 80 ポンド砲 4 挺と 24 ポンド砲 1 挺であると考えられている。



発掘時の状態　　洗浄後の状態

Cu：89.7%　　Sn：9.20%　Pb 検出されず

図 34　韮山反射炉の発掘調査で発見された青銅の切粉

3.8 韮山反射炉の大砲の数

韮山反射炉で鋳造された大砲の数については諸説あり、今ひとつ明確ではない。表 8 に比較的信憑性の高い文献からの調査結果を示す。これらの調査結果から推測すると、反射炉日記に記されている 3 門のみが鋳鉄製の大砲であったと考えるのが妥当である。この 3 門のうち 1 門には、亀甲銑が使われており、加工後試射まで行われたと考えられる。

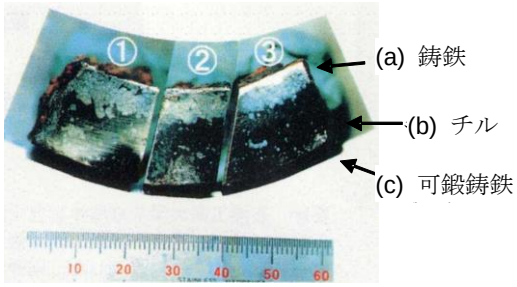
表 8 韮山にて鋳造した鋳鉄製大砲の推測数

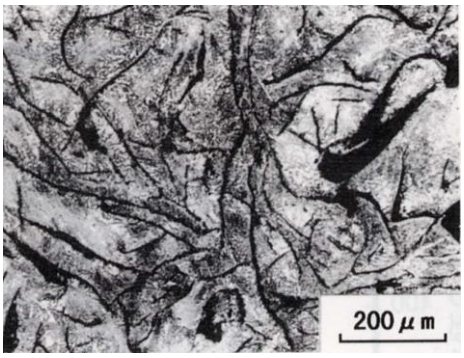
文献名	内容	個数
韮山反射炉築造記録等より [1, p23]	鋳鉄製の 18 ポンド砲を 3 個鋳込んでいる。1 番 18 ポンド砲は加工は行っている。3 番 18 ポンド砲は加工し、試打まで行っている。 銅製 80 ポンド 4 挺、24 ポンド 1 挺、計 5 挺。	鋳造を行ったのは鋳鉄製 18 ポンド 3 門、銅製 3 挺以上、試打は鋳鉄製 1 門。
慶応 2 年（1866 年）陸軍奉行への目録 [1, p23]	完成大砲 14。半製品 50。不良砲 36 挺。	材質は不明。 購入品もあるかもしれない。
大筒数調査帖 [1, p20]	品川お台場へ、韮山より 86 門、佐賀藩 50 門、湯島桜馬場鋳立分 175 門、大阪表取寄分 5 門を鋳造し、送られる予定。	ただし、予定なので不明。
島津家調「各藩兵器及反射炉」[1, p21]	1 番お台場には韮山反射炉で作製した大砲が、80 ポンド 10 門、24 ポンド 2 門、12 ポンド 12 門、ランゲホウィッスル 4 門の計 28 門。	28 門。
洋式製鉄の萌芽 芹澤正雄 [21, p94]	試し溶解が 5 回、2 炉合わせによる 18 ポンド砲の鋳造が 3 回行われている。文久 3 年末（1863）から元治元年（1864）にかけて、銅砲が 128 挺鋳造され、100 挺が不良。	鋳鉄製 18 ポンド 3 門、銅製 128 挺（内 100 挺が不良）。
窪田蔵朗；金属 [22, P67]	鋳鉄製砲 75 門を作り、巣などの欠陥がなかったのは 12 門。	75 門つくり 12 門成功

3.9 萩で試射された大砲の砲弾

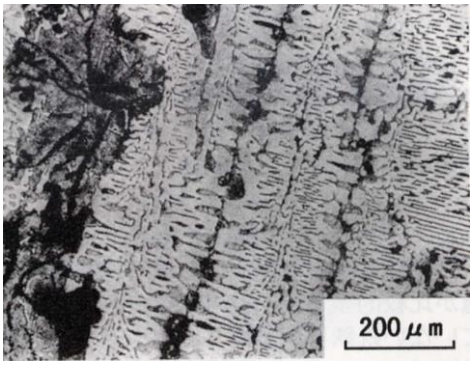
図 35 に萩で試射された大砲の砲弾の組織写真と成分を示す。この砲弾は内部（a）が加工できる鋳鉄であり、外側（b）はチル鋳物、表面層（c）はチル鋳物を熱処理してつくることができる白心可鍛鋳鉄（鋼）の 3 種の複合材よりできている。また片状黒鉛部はシリコンが 0.17%と高く、炭素も過共晶成分である 4.32%よりできている。鋳鉄部とチル部の界面は凹凸になっていることから、2 種類の成分の溶湯を鋳込んで複合材としていることが推察される。大砲の玉は中が空洞の球形であるから、重力によって 2 種類の溶湯が分離することを防止しながら、どのようにしてこの砲弾をつくったかは、興味ある謎である。

ちなみに、24 ポンドカノン砲の最大射程距離は 2793m、18 ポンド砲は 2600m である。韮山反射炉にある青銅製の、いかにも飛びそうにもない 20 ドイム臼砲でも火薬の量が 469g の場合で 1364m の飛距離である。

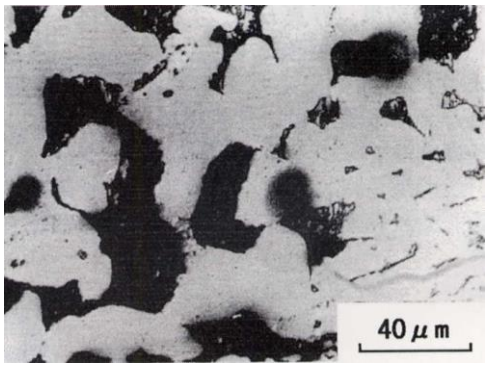




内側(a)白色部の鋳鉄



外側(b)のチル組織



表面(c)の可鍛鋳鉄

	C	Si	Mn	P	S
萩砲弾の成分範囲	3.7～4.3	0.0015～0.16	—	0.05～0.16	0.05～0.14
片状黒鉛部	4.32	0.17	＜0.005	0.15	0.018

図 35　萩で試射された大砲の砲弾の組織写真（芝浦工業大学　中田毅先生提供）

まとめ

紙面の都合で、全ての項目（謎）について説明することができなかったが、韮山反射炉の謎について整理すると、表 9 のようになる。

韮山の反射炉で鋳鉄が溶けなかったとするには、反射炉日記の内容から推察しても難しい。日記の通り、鋳鉄製大砲は 3 門鋳造し、試射までいったのは 1 門と考えるのが妥当であると考えられる。また、チルでない加工できる鋳鉄をつくる方法としては、(a) シリコン 0.5%程度の亀甲銑を 23%用い、溶湯のシリコン量を 0.15%とし、(b) カーボンを 1250℃の溶湯に浮かべて、カーボンが 4.5%になるよう調整し、炭素 4.3%以上のチルしない過共晶成分の鋳物で鋳込んだ可能性が高い。この 1250℃と云う温度は、反射炉で溶解できる十分に低い温度である。

良い鉄原とされる南蛮鉄や船のバラストは、調査する限りはチル鋳物であった。当時は、外国からも鋳鉄製大砲を購入していることから、現在残っている大砲で炭素 3.2%、シリコン 0.5%程度の成分のものは外国製の大砲であった可能性は高い。炭素の低い加工可能な鋳鉄でありなおかつ強度の高い鋳鉄製大砲がつくれるようになったのは、やはりシリコンが得られる高炉ができてからと考えられる。

本稿が、世界産業遺産である韮山反射炉を含む「九州・山口の近代化産業遺跡群」の手助けになれば幸いである。また、鋳造工学への関心を 1 人でも多くの人が持って頂ければ幸いである。

表 9　韮山反射炉 10 大ミステリー

	韮山反射炉に残された謎	結論
溶解関係	①鋳鉄湯は溶けたか？	溶解温度は、1250℃程度である．この温度は、川口の鋳物師増田安治郎が作った安乗神社の大砲と同じ炭素が約 4.5%になるための溶解温度である．
	②溶解温度は？	
	③溶解時間は？	火入れから注湯完了まで 8 時間．鋳込の約 1 時間は、1150℃から 1250℃の昇温に要した時間の可能性が高い．
	④鋳込み方法は？	大砲は垂直に立てて、押し湯部から、直接溶湯を注いだと思われる．取鍋やクレーンは使っていない．
	⑤「ふいご」は用いられたか？	「ふいご」を炎の調整に用いた可能性は残る。
	⑥溶解燃料は？コークスは使われたか？	最初は炉を予熱するために木炭等を用い、その後温度が上がるにつれ石炭、最後にコークスを使用した。
	⑦溶解材料は？岩見の砂鉄・岩手の岩鉄（鉄鉱石）・輸入銑（南蛮鉄）・バラスト	佐賀藩ではバラストを用いてシリコンを高くしたといわれているが、バラストにはシリコンは含まれていない可能性が高い。韮山では、3 番目の大砲にシリコンの高い(約 0.5%)と思われる亀甲銑を使用している。亀甲銑をどこから手に入れたかが次なるミステリーである。
煉瓦	⑧反射炉の煉瓦はどこで焼いたか？	○印の付いた煉瓦は河津梨本のものであり、付いていないものは韮山の裏山。煉瓦は白色のアルミナ系粘土を焼いて作った耐火煉瓦である。
その他	⑨韮山反射炉での大砲の鋳込み数と完成品の数	*鉄製 4 門鋳造し、試打は 1 門、青銅製は 3 挺以上。(4 門目の鋳造に関する資料は最近見つかった．）3 番砲の加工日数 14 日以内
	⑩鋳鉄製の大砲の成分の問題	シリコンの高い溶解材料が入手できなかったことが主原因である。このため、川口の鋳物師増田安治郎が作った安乗神社の大砲成分と同じ、炭素量約 4.5%以上のチルしない過共晶溶湯で鋳込んだものと思われる。過共晶成分ならば、加工と火薬量半分の試打までは可能である。しかしながら、実戦では強度と耐衝撃性不足で破裂した可能性が高い。佐賀や韮山の大砲が実在しないのは、この事が原因と思われる。

※最近の調査で、3 門ではなく、4 門目が鋳造され、試打まで行われたことがわかった。

参考文献

1) 韮山町「史跡韮山反射炉」(保存修理事業報告)(韮山町)(1989)
2) 石野亨「鋳造技術の源流と歴史」産業技術センター(1977) 2, 15
3) 石野亨「鋳物五千年の足跡」日本鋳物工業新聞社(1994) 5, 15, 159
4) 石野亨「鋳物の文化史」小峰書店 (2004) 8
5) 佐々木稔ら「鉄と鋼の生産の歴史」雄山閣 (2002) 4
6) Tan Derui: The ancient Chinese casting techniques, The 69th WFC paper (2011) 129
7) 宋応星 (藪内清訳)「天工開物」東洋文庫 (1969) 290
8) 真殿統ら「可鍛鋳鉄」開発社 (1964) 13, 260
9) 素形材センター編:素形材の組織　日刊工業新聞社(1988) 7
10) 菅野利猛・岩見祐貴・中江秀雄ら：鋳鉄溶湯における湯面模様とその発生メカニズム、鋳造工学　87 (2015) 9
11) 中江秀雄：鉄鋳物の技術系統化調査 Vol.6 (2013) 19
12) L.E. Samuels:「The metallography of cast iron relics from the bark Endeavour」Metallography 13 (1980) 345
13) 佐藤健二ら:第159回日本鋳造工学会全国講演大会(2011) 143
14) 大橋周治：ヒュゲーニンの原料銑規定と砂銑鉄、鉄と鋼73(1978)11号 1443
15) 菅野利猛ら:鋳鉄の共晶温度に対する各種合金元素の影響、鋳造工学 70(1998) 773
16) 大橋周治：幕末明治製鉄論・アグネ(1991) 252
17) 佐賀県立博物館:幕末における佐賀藩鋳造の大砲とその復元 (佐賀県立博物館) (1979)34, 39
18) 西岡昭夫:龍城論叢 (静岡県立韮山高等学校) 11 号(1986)
19) 西岡昭夫:龍城論叢 (静岡県立韮山高等学校) 12 号(1986)
20) 金子功：反射炉Ⅱ・大砲をめぐる社会史、法政大学出版局(1995) 323
21) 芹沢正雄:洋式製鉄の萌芽　蘭書と反射炉 (アグネ技術センター) (1991) 94
22) 窪田蔵朗：ゆれ動く幕末の兵器工場、金属 (1967) 1月号 67
23) 千野俊猛:図解　鋳造用語辞典、日刊工業新聞社(1995) 154, 159