JFE 技報 No. 11
（2006 年 4 月）p. 1–8

大型高炉の超短期改修技術

Short-Term Revamping Technology for Large Blast Furnace

藤田　昌男　FUJITA Masao　　JFE スチール　西日本製鉄所（福山地区）　設備部高炉改修班　主任部員
徳田慶一郎　TOKUDA Keiichiro　JFE スチール　西日本製鉄所（倉敷地区）　設備部長
小島　啓孝　KOJIMA Hirotaka　JFE メカニカル　高炉改修プロジェクト　副部長

要旨

高炉は約 15 年ごとに改修工事が必要であり，大型高炉では従来工法による改修工事中の休止期間は約 130 日であった。JFE スチールは従来工法による改修期間を半減化する大ブロックリング工法を開発し，東日本製鉄所（千葉地区）第 6 高炉（1998 年）で 62 日改修と世界最短記録を実現した。さらに JFE スチール最大の西日本製鉄所（福山地区）第 5 高炉（2005 年）では，同工法により 58 日改修と世界記録を更新している。従来工法による高炉改修では，炉体（10 000 t）の解体，据え付けともに 10 ～ 20 t 単位で行っていたが，大ブロックリング工法は 2 000 t の大ブロック単位で炉体の解体，据え付けを行う画期的な工法である。

Abstract:

To revamp a blast furnace (BF) is required about every 15 years, and revamp duration by a conventional method is around 130 days. JFE Steel has developed a new revamping method, so called “Large Block Ring Construction Method.” By employing the method, the revamp duration was remarkably reduced to a half of a conventional one. A furnace body (10 000 t) was segmented into blocks of 10 t to 20 t weight during dismantling and installation in conventional method. Blocks by the Large Block Ring Constitution Method weigh over 2 000 t a piece. Consequently, the revamp duration of No. 6 BF at East Japan Works (Chiba) in 1998 was only 62 days, which was the world shortest record of revamp duration. The method was also successfully adopted to No. 5 BF at West Japan Works (Fukuyama) in 2005, and established a new world record of 58 days.

1. はじめに

近年の一貫製鉄所では，高炉は溶銑の供給だけではなく，製鉄所全域に副生ガスを供給するエネルギー基地の役割も果たしている。高炉はいったん火をいれると炉体の寿命がつきるまで溶銑と副生ガスを連続して供給し続けるが，寿命を迎えるたびに操業を停止して，高炉の補修工事（改修工事）をして再稼働する。改修工事期間は溶銑と副生ガスの供給が停止するため，改修期間の短縮と改修のサイクルである高炉寿命の延長が製鉄所にとって重要である。近年の大型高炉では，改修期間は 130 日前後，高炉の寿命は 15 年前後であったが，JFE スチールでは，西日本製鉄所（福山地区）第 5 高炉の 58 日改修，倉敷地区第 2 高炉（2003 年）の 24 年 5 ヶ月寿命と，短期改修と長寿命の両方の世界記録を有している。短期改修については，1998 年東日本製鉄所（千葉地区）第 6 高炉改修時に従来の改修期間を半減化する大ブロックリング工法[1~3]を世界にさきがけて開発した。福山地区第 5 高炉の 58 日改修も同工法による改修であり，本論文では，大ブロックリング工法による超短期改修の概要と本工法を可能とした主要開発技術を紹介する。

2. 開発概要

高炉は地上高 110 m，総質量約 10 000 t の大型構造物である。高炉の改修工事とは炉体本体を解体し，新たに組み立てる工事である。従来の高炉改修工法は，炉体を数十トンのブロックに分けて，解体･組み立てを行なう労働集約的な工法であったが，大ブロックリング工法は，事前に新しい炉体を約 2 000 t の大ブロック 3～4 分割で製作しておき，改修中にはブロックの搬送と接合作業のみを行なう画期的な工法である。**Table 1** に大ブロックリング工法と従来工法を比較した。

JFE スチールでは，1998 年以降の改修において，**Table 2** に示すように，大ブロックリング工法による短期改修を実施している。高炉の改修期間は，高炉の内容積に比例するが，**Fig. 1** に国内高炉の改修期間を示す。福山地区第 5 高炉は JFE スチール最大の高炉であるが，改修期間 58 日を実現し，千葉地区第 6 高炉の改修最短記録 62 日を

Table 1　Comparison of conventional revamp and Large Block Ring Construction Method

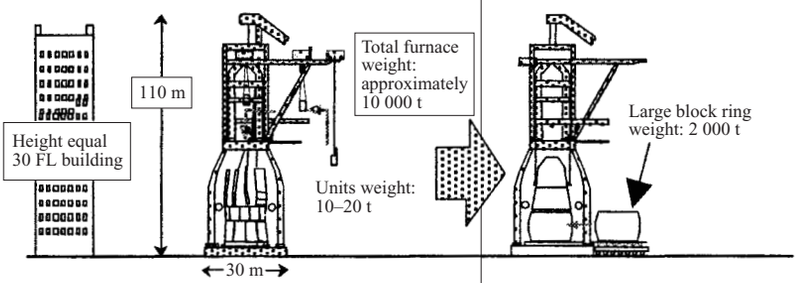
Revamp method	Conventional revamp	Large Block Ring Construction Method
		
Construction method	Carry 10–20 t shell units into site and assemble at site	Transport pre-assembled ring-blocks of 2 000 t into site
Unit number and weight	500–1 000 units 1 unit: 10–20 t	3–4 units 1 unit: 2 000 t
Revamp duration	130 days	58 days

Table 2　Revamp duration by large block ring method

	Chiba No. 6 BF	Kurashiki No. 4 BF	Kurashiki No. 2 BF	Fukuyama No. 5 BF
Revamp duration (day)	62	70	75	58
Revamp time (year)	1998	2001	2003	2005
Inner volume (m^3)	5 153	5 005	4 100	5 500

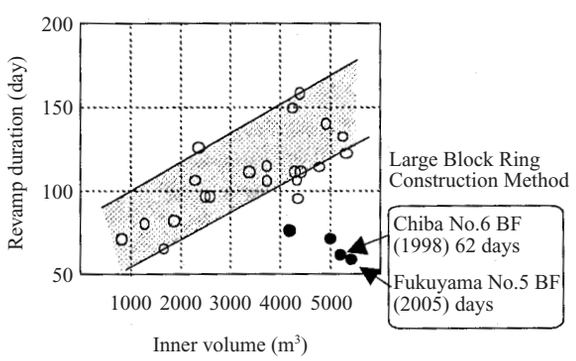


Fig. 1　Relation between inner volume and duration of revamps

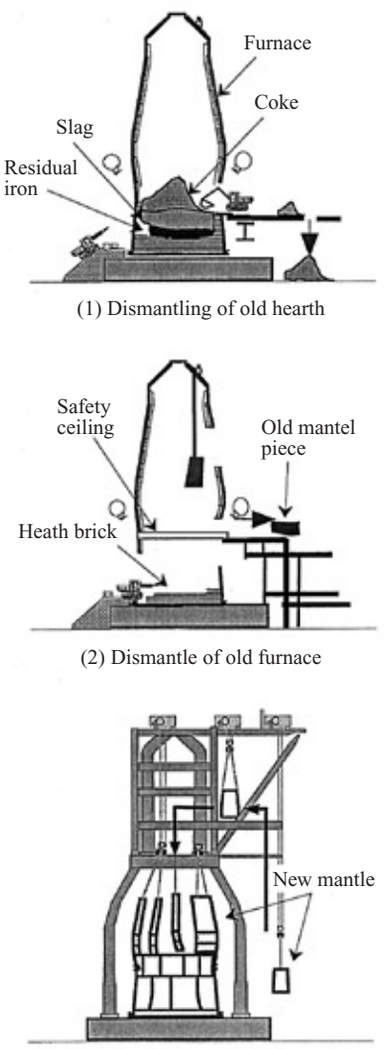


Fig. 2　Outline of conventional method

更新している。

3.　従来工法とその問題点

3.1　従来工法の概要

従来工法は，約 1 500 人 / 日の作業員を動員した労働集約的な工法で行なっていた。作業場所が狭く，解体・組み立てを順次行なうため，大幅な工期の短縮は困難であった。以下に従来の改修の工事概要を説明する（**Fig. 2**）。

(1) 炉底残留物解体

高炉操業停止後，冷却した後，炉底の残留物（スラグ・コークス）をショベルなどで掻き出し，炉底に残った銑鉄（残銑）は発破により数十トンに小割りして運び出す。残銑の解体は発破・搬出工程が律則となり，解体には約 30 日を要する。

(2) 旧炉体解体

旧炉体は小割りに切断し解体して行くが，ブロック

数が多くまた場所が狭いこと，搬出ルートが制限されることなどから約 20 日を要する。

(3) 新炉体・冷却設備組み立て

新炉体は，クレーンの吊り能力などの制約から，数十トンのブロックを狭い炉内に横持ちし組み立てる。次に，冷却設備（ステーブ）約 500 枚をクレーンで搬入し，炉体に取り付ける。搬入ブロック数が多く，約 40 日を要する。

(4) 炉体レンガ積み・火入れ準備

約 40 日を要する。

従来工法では上記（1)～(4）の合計で約 130 日の工期を要する。

3.2 従来工法の問題点

従来工法の問題点を以下に説明する。

(1) 改修短期化の限界

炉体の解体工事・組み立て工事ともに，搬出能力・吊り能力の制約から搬出入部材の重量は数十トンに制限され，ブロック数が 500～1 000 となる。作業場所が狭く，搬出・搬入ルートも制限されるため，1 日の工事量は 10～20 ブロックが限界であった。このため，従来工法の改修期間は約 130 日が限界で，大幅な期間短縮は困難であった。

(2) 劣条件下の作業環境

炉内の作業は，狭い場所での重量部材の搬出・搬入作業であり，落下・狭圧事故発生の懸念があった。また，残銑は発破によって小割りにするため，形状が不規則で搬出には粉塵環境の中，多大な労力を要していた。

(3) 熟練作業員の枯渇

炉内の重量部材搬出入作業は，高所の狭いスペースの中で重量部材を所定の位置に設置する熟練作業であり，高炉改修には多くの熟練作業員を必要としていた。しかしながら，近年の高炉大型化および長寿命化にともない高炉改修頻度が減り，熟練作業員の確保が困難となってきた。

これらの問題点の解決には，事前に新しい炉体を 3～4 分割した大ブロックリングを製作しておき，ブロック単位で搬送する工法が考えられた。すなわち，大ブロックリング工法を実現することにより，改修期間の大幅短縮をはじめ，上記の課題すべてを解決することが可能であると考えた。

4. 大ブロックリング工法の概要

大ブロックリング工法は，炉体を 3～4 ブロックに分割した大ブロックにて解体・組み立てを行なう画期的な高炉改修工法である。以下にその概要を説明する。

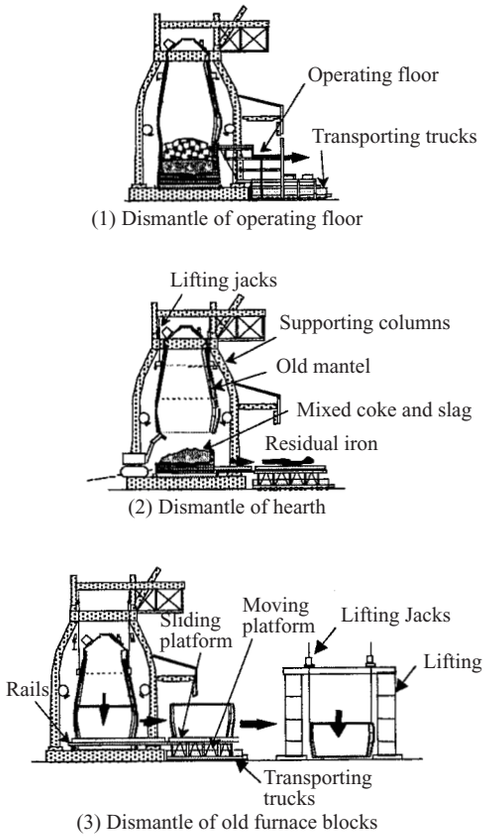


Fig.3 Outline of dismantling operation in large block ring method

4.1 解体工程

解体工程の概要を **Fig. 3** に示す。

(1) 作業床一体解体

炉体を大ブロックで搬出・搬入するルートを確保するため，作業床を搬送台車で一体搬出する。

(2) 炉底解体

炉底残留物（コークス・スラグ）を解体し，残銑をブロックで搬出する。炉体は，高炉架構の上部からリフトジャッキで吊り下げる。

(3) 旧炉体ブロック搬出

炉底解体後炉内にレールを敷き，3 分割した炉体ブロックをスライド台車に載せ，高炉の基礎（地上から 5～7 m 高さ）と同レベルとなる搬送架構上に移動する。オフラインにある吊り換え設備まで搬送台車で搬送し，吊り換え設備のリフトジャッキで吊り下げ着地する。

上記（1)～(3）の工程を繰り返すことより，旧炉体を大ブロックで解体することを可能とした。

4.2 組み立て工程

例として，新炉体を 4 分割した場合の大ブロックリング工法における組み立て工程の概要を **Fig. 4** に示す。

(1) 新炉体ブロック事前施工

新炉体は，4 ブロックに分割して，事前に製作する。

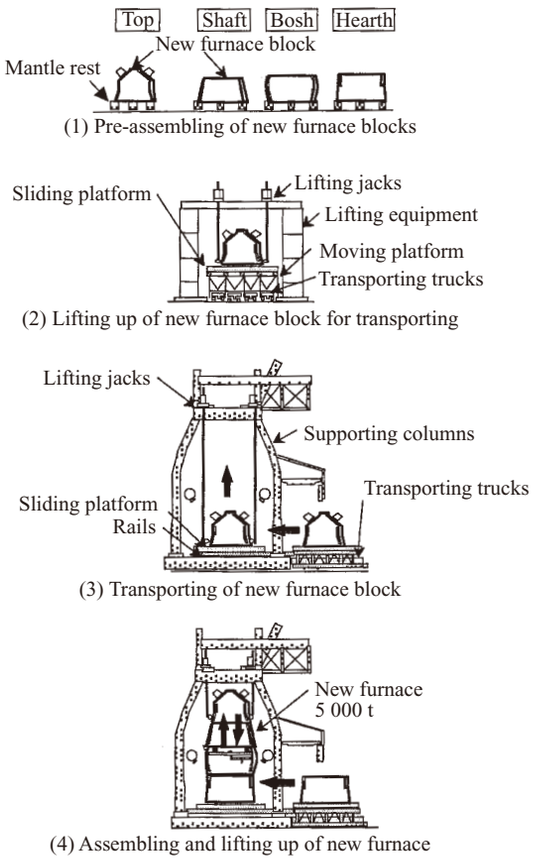


Fig. 4　Outline of assembling operation in large block ring method

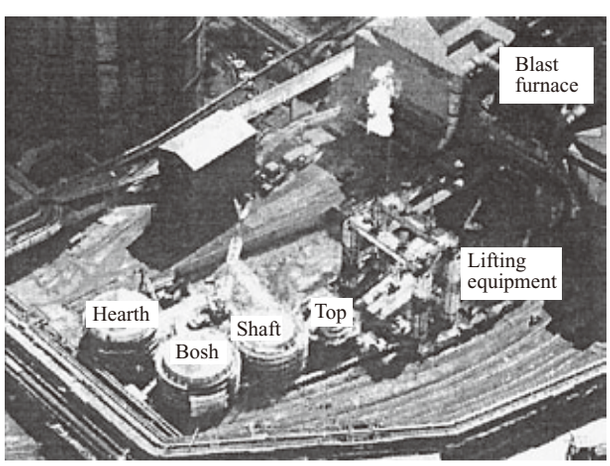


Photo 1　Pre-assembling of new furnace blocks

各ブロックでは炉体鉄皮・冷却設備（ステーブ）およびその間の耐火物を事前に施工し，大ブロックリングとする。各ブロックの質量は1 000～2 000 t である（**Photo 1**）。

（2）新炉体ブロック搬送準備

新炉体ブロックを吊り換え設備で吊り上げ，搬送架構上に載せる。

（3）新炉体ブロック搬入

新炉体ブロックは，搬送台車で炉体基礎まで運び，スライド台車で高炉架構内に移動する。高炉架構上部のリフトジャッキで炉体ブロックを吊り上げ，スライド台車を引き出す。同様の工程で順次炉体ブロックを炉内に搬入し，次のブロックを接合・溶接して吊り上げる。

（4）新炉体一体吊り上げ・据え付け

最後の炉体ブロックを炉内に搬送し，上のブロックと接合･溶接した後，総質量5 000 t の炉体を吊り上げ，スライド台車を炉外に引き出す。その後，炉体を基礎上に据え付け新炉体の組み立ては完了する。

以降，炉内レンガ積み・火入れ準備を行なう。炉体解体および新炉体の組み立てを大ブロックで行なうことにより，大幅な工程短縮が可能となる。

5.　大ブロックリング工法達成のための開発技術

以下に示す7項目の技術開発により，大ブロックリング工法による超短期改修の実現が可能となった。

5.1　耐火物複合構造体の搬送揚重技術

炉体ブロックは，鉄皮・ステーブ・耐火物の複合構造体（**Fig. 5**）であり，搬送揚重時，高炉の寿命にもっとも影響する耐火物の亀裂防止が最重要課題であった。しかしながら

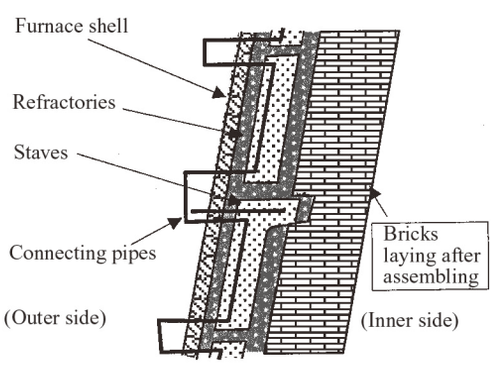


Fig. 5　The section of furnace block

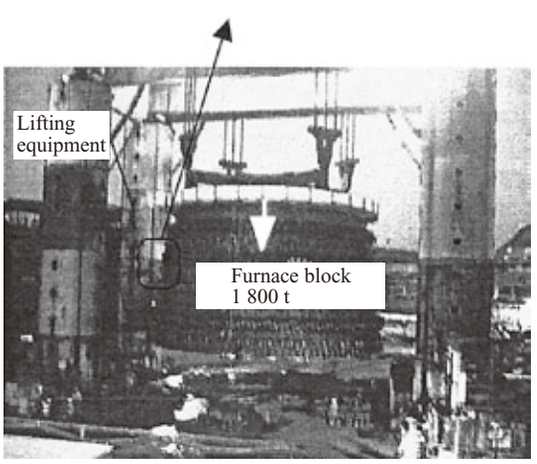


Photo 2　4 points supporting in lifting equipment

ら，複合構造体における耐火物の亀裂発生についての知見がなかったため，実機大のモデルを製作し耐火物の亀裂発生条件を実験的に解析した。実験は炉体ブロック搬送揚重時に，炉体ブロックの変形が最も大きくなる吊り換え設備での4点支持（**Photo 2**）条件で行なった。

実験の結果から以下を確認した。

(1) 炉体ブロックの変形防止に必要な補強構造および補強材の強度

(2) 耐火物に亀裂を発生させない炉体ブロックの変形限界量

また，実験データを応用することにより複合構造体の構造解析の精度が向上し，形状の異なる炉体ブロックに対する補強構造の設計も可能となった。本技術開発により，複合構造体である炉体ブロックを，耐火物に亀裂を発生させることなく，搬送揚重することが可能となった。

5.2 高効率構造解析システムの開発

大ブロックリング工法では，炉体ブロックの接合が完了した段階で，総質量5 000 tの炉体を高炉架構を用いて吊り上げる必要がある。しかし，高炉架構の梁の支持能力は約1 000 tであり，一体化した5 000 tの炉体を吊り上げるためには，梁を大幅に強化する補強架構を設置する必要があった。高炉架構は，一般構造物と比較して，複雑な3次元構造を有しており，荷重条件も数千トン，使用部材も3 mを越し，解析容量が大きいため，通常の構造解析システムでは高炉架構モデルを数十ケースも解析することは困難であった。そこで，高炉架構に特化した高効率な構造解析システムJBSD（JFE Steel blast furnace structure design system）[4]を開発した。システムの特徴は次のとおりである。

(1) 高炉架構で使用している部材に特化した全部材・全断面すべての応力を自動計算する。

(2) 計算した数百万個の応力値からグループ毎の応力最大値を自動検索する。

(3) 基本的な荷重条件の入力により，高炉特有の地震荷重など，約30の荷重条件を自動生成する。

JBSDによる補強架構の解析例を**Fig. 6**に示す。本解析システムにより，高炉架構約100モデルを短期間に解析することが可能となり，5 000 tの炉体を吊り上げる補強架構の設計を実現させた。

5.3 片面開先溶接技術

大ブロックリング工法では，現地溶接を上下の炉体ブロックリング間の溶接のみとし，現地溶接量を従来の1/10以下にして，改修期間の短縮を可能にしたが，炉体ブロック間の現地溶接には，解決すべき以下の課題があった。

(1) 炉体ブロックの内部に耐火物･ステーブがあり，溶接は外面からの片面開先溶接に限定されるが，厚板の片面開先溶接に必要な裏当て金は現地では施工できない

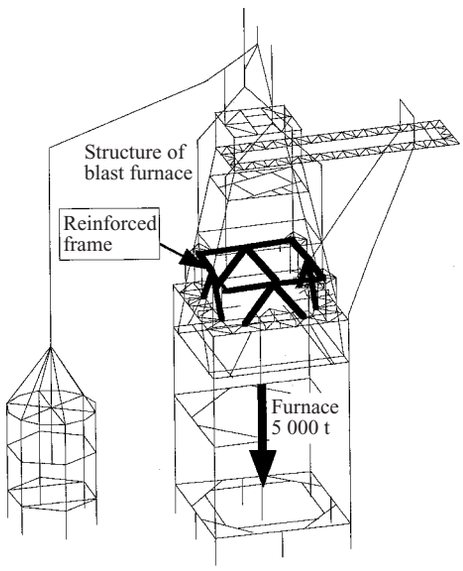


Fig. 6 Model for framed structure analysis of blast furnace

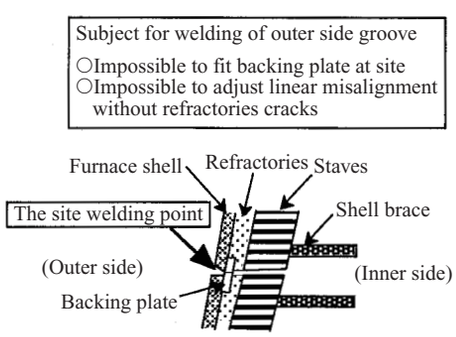


Fig. 7 The welding of one side groove

（**Fig. 7**）。

(2) 耐火物に亀裂を発生させるので，現地接合部の鉄皮の目違いは強制修正できない。裏当て金は事前につける前提とし，鉄皮接合精度による制約（最大目違い6 mm）を考慮して，開先と裏当て金の最適寸法形状および溶接条件を実験的に求め，無欠陥溶接が可能との結論に達した。

本技術の開発により，大ブロックリング工法における炉体ブロック間の溶接が可能となった。

5.4 鉄皮接合の高精度化技術

大ブロックリング工法では，耐火物の亀裂発生を防止するために，鉄皮の目違いを現地で修正することは不可能である。したがって，現地溶接直前まで，接合部の精度を維持することは必須の条件であった。接合部の高精度化を実現するため，接合部の上下の鉄皮を工場で一体化してリングに仕上げ，接合部の精度は目違い3 mm以下とした。この状態で，接合部の上下に5.1節で述べた鉄皮補強材を設置し，鉄皮リングを拘束することにより，鉄皮輸送･事前組み立てから現地接合までの鉄皮の変形を抑制して，接合部

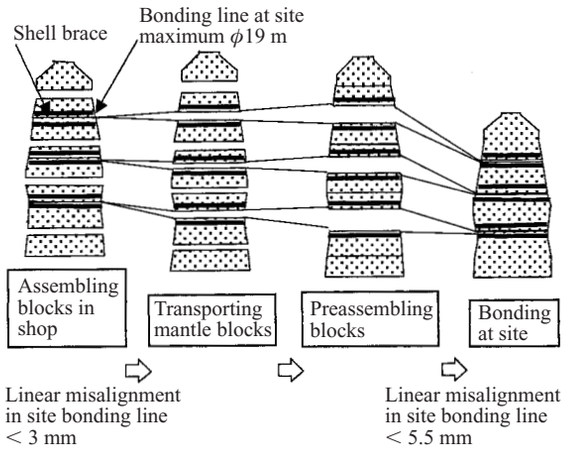


Fig. 8　Technology of precise bonding by welding between large block rings

の高精度化を実現した。接合部の位置決めについては，工場内で芯合わせ治具を設置し，現地接合時でも工場の位置決め精度を再現した（**Fig. 8**）。

鉄皮ブロック間接合の高精度化技術により，現地接合時の目違い 5.5 mm 以下を実現し，接合部の健全な溶接と迅速な位置合わせ作業が可能となった。

5.5　残銑ブロック搬出技術

高炉炉底の残銑を発破で小割りにせず，550t の残銑ブロックを一体で搬出することにより解体工程を大幅に短縮した。以下にその工法を説明する。

(1) 残銑を炉底レンガよりジャッキアップし，その下部に大荷重用の台車を挿入し，搬送架構の上に引き出す。
(2) 残銑ブロックを吊り換え設備まで搬送し，吊り上げる（**Photo 3**）。
(3) 吊り換え設備で残銑を吊り下げて搬送台車に載せ，残銑置き場に搬送する。

残銑のブロック搬出を実現するためには，大重量の残銑ブロックを吊り換え設備で吊ることが必須である。残銑は，不規則な形状であり，溶接もできないため厚板製のバンドで吊る方法を考案した。吊りバンドの形状は事前に鍛造プレスによる実機大･実負荷実験を行ない，バンド幅全面に均一に荷重分散可能な最適形状を求めた。本技術の開発により，残銑解体工程の大幅な短縮を実現した。

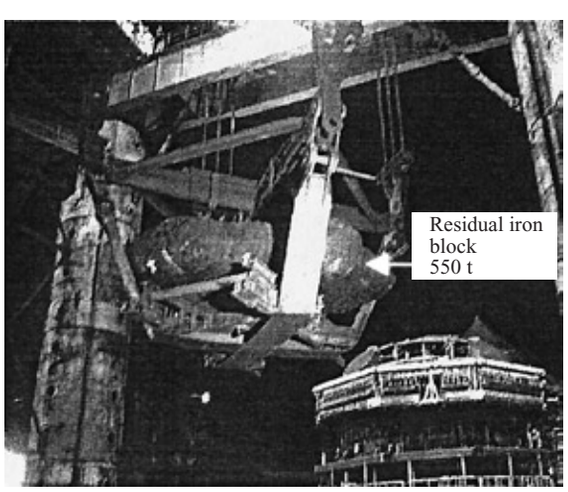


Photo 3　Hanging up large residual iron block

5.6　重量物搬送揚重技術

炉体ブロックは，吊り換え設備で吊り上げ，搬送架構に載せて炉体基礎まで搬送する。搬送架構上から炉体基礎上には，スライド台車で移動する。2 000 t の重量物搬送揚重にともなう地盤沈下の対策が必要であった。吊り換え設備で 2 000 t の炉体ブロックを吊り上げる時には，4 本の支柱それぞれに 650 t の基礎荷重が作用する。しかし，改修工事での炉体を吊っているのは数時間内と短いことに着目し，改修期間の短縮を図るため，基礎レス化に取り組んだ。基礎部分は，従来のコンクリート基礎に替えて大型スラブを敷き，荷重を分散する構造とした。また，改修工事工程を厳密に検討し，吊り換え設備で炉体ブロックを吊っている時間が最短になるように，吊り設備などを改善した。吊っている時間内での地盤沈下量の変化を事前に調査した。4 本の支柱それぞれの地盤に実荷重をかけた結果，地盤の沈下量は最大でも 30 mm で安定し，炉体を吊っている時間内であれば，沈下量の変化は問題ないことを確認した。また，スプリングバック量も最大 10 mm であり，これらの補正は吊り換え設備のリフトジャッキで行なうこととした（**Fig. 9**）。高炉基礎前まで搬送した炉体ブロックを仮置きする時も，事前に炉体ブロックと同荷重となる大型スラブを敷いて，地盤沈下量を確認した。本技術により，恒久的基礎を設置することなく，2 000 t の炉体ブロックの搬送揚重を可能とした。

5.7　省スペース化技術

千葉地区第 6 高炉改修では，15 000 m^2 の工事用スペースで大ブロックリング工法を実現したが，倉敷地区第 4 高炉改修（2001 年）で確保できる工事用スペースは高炉周辺の線路，スラグ処理用のドライピットを活用しても

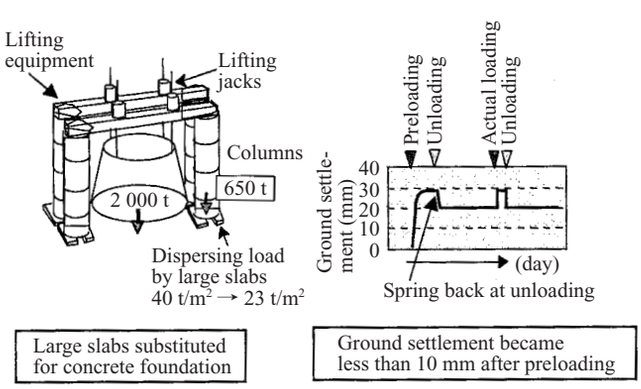


Fig. 9　Technology of foundationless lifting equipment and settlement trend at loading

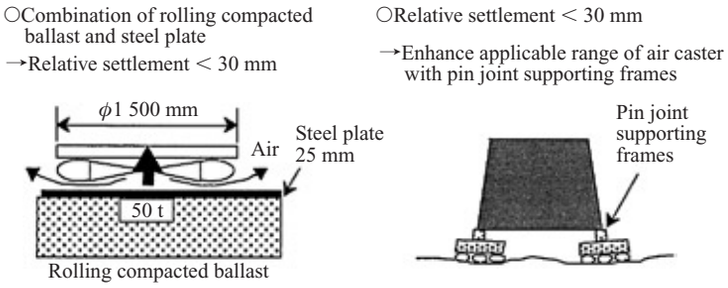


Fig. 10　Technology of using foundationless air caster

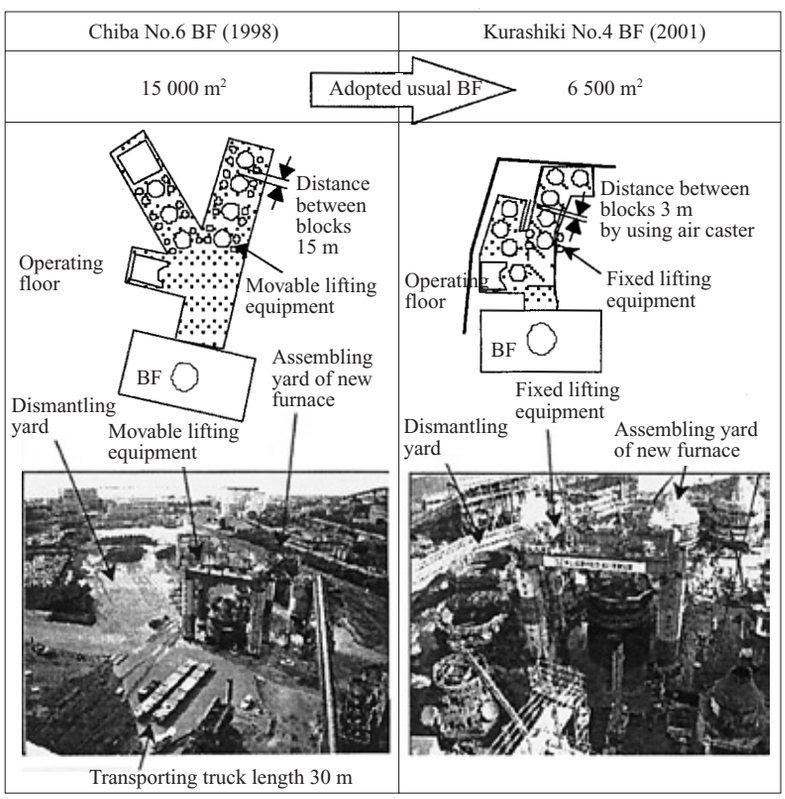


Fig. 11　Comparison of revamping area

6 500 m^2 が限界であった。大ブロックリング工法の採用を一般高炉まで拡大するために，省スペース化技術が必要であり，以下の技術を開発した。

(1) エアキャスタによる炉体ブロックの搬送技術

千葉地区第 6 高炉では，炉体ブロックを長さ 30 m の搬送台車で搬送するため，炉体ブロック間に 15 m のスペースを要した。しかしながら，倉敷地区第 4 高炉では，炉体ブロック間のスペースは 3 m が限度であり，小型で荷重負荷の大きいエアキャスタを採用した。エアキャスタを使用するためには，空気圧 0.35 MPa に対するシールと，基礎荷重 35 t/m^2 以上の強度を有する平坦なコンクリート製基礎が使われている。しかし，以下の技術を開発し，工事期間を短縮した。

(a) 地盤は，バラスを転圧した上に板厚 25 mm の鉄板を敷くことで，エアキャスタの安定浮上が可能となり，その使用条件を満足することを検証した。

(b) 転圧バラスの平坦限界と地盤の不等沈下により，エアキャスタ使用時の地盤の平坦精度は約 30 mm であった。その変動に追従するため，エアキャスタの架構には回転支持構造を採用した（**Fig. 10**）。

(2) 吊り換え設備の固定化

炉体ブロックを組み立て場から吊り換え設備まで搬送することにより，炉体ブロックを吊り上げる吊り換え設備を固定配置とした。このため吊り換え設備の移動が不要となり，工事用スペースを大幅に削減した（**Fig. 11**）。

省スペース化技術により，大ブロックリング工法が一般の高炉に適用可能となり，倉敷地区第 2 高炉でも採用した。

6. 大ブロックリング工法開発の成果

本開発により実現した大ブロックリング工法の成果は，

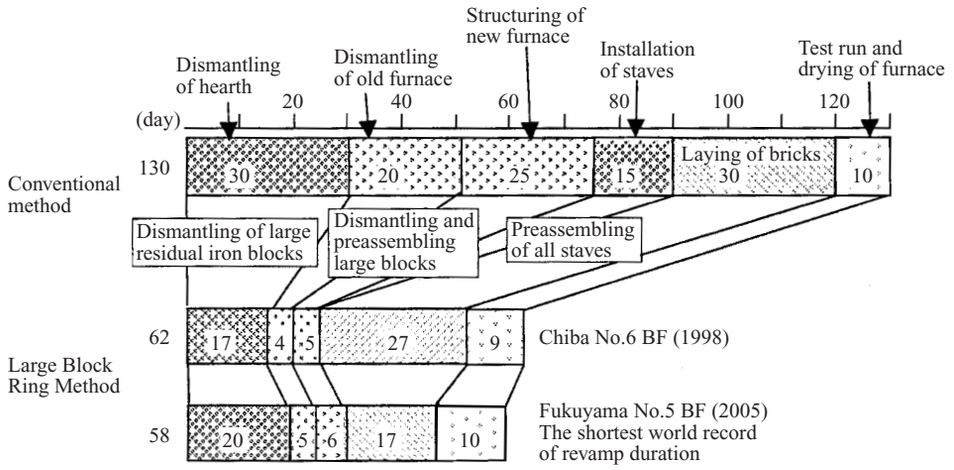


Fig. 12　Duration of revamps using conventional and new method

下記（1)～(3)項である。

(1) 改修期間半減

(2) 作業の本質安全化

(3) 炉体施工精度向上による高炉長寿命化

改修期間の半減化に関して，各工程の従来工法との比較を **Fig. 12** に示す。旧炉体解体･新炉体組み立て･ステーブ取り付け工程では，従来工法の 1/6 に短縮できた。

安全に関しては，大ブロックリング工法では，炉体の解体・組み立て方法を抜本的に変更したため，高所・狭隘作業を従来に比べ半減することができた。さらに，残銑解体にともなう発破工事も大幅に削減できた。

7. おわりに

JFE スチールでは，大ブロックリング工法技術を開発し，1998 年の千葉地区第 6 高炉改修では，62 日間の短期改修を達成した。さらに，大ブロックリング工法の省スペース化技術の開発によって，倉敷地区第 4 高炉，倉敷地区第 2 高炉も同工法による短期改修を実現した。福山地区第 5 高炉は，JFE スチール最大の高炉であるが，さらなる短縮化工法を開発して，58 日と改修短期化の世界記録を更新した。2006 年 2 月 22 日に開始し，現在改修工事中の福山地区第 4 高炉（改修後内容積 5 000 m^3）の改修では，炉体の大ブロックリング工法に加え，炉頂設備も大ブロックで解体・組み立てする新たな工法を採用し，短期改修工法をさらに進化させている。

参考文献

1) Fujita, M.; Kojima, H.; Marushima, H.; Kawai, T. Iron and Steel Engineer. 1999-06, p. 38–42.
2) Fujita, M.; Kojima, H.; Marushima, H.; Matsumoto, T.; Yokogawa, A. La Revue de Metallurgie. 1999-03, p. 350–357.
3) 松田恵嗣，増野豊彦．川崎製鉄技報．vol. 32，no. 3，2000，p. 194.
4) 岩田光司，森本照明，金谷弘，市原勲，藤田昌男，清原庄三．川崎製鉄技報．vol. 15，no. 3，1983，p. 193–200.

藤田　昌男

徳田慶一郎

小島　啓孝