

転炉設備の長寿命化技術の確立

～20年以上連続稼働可能な転炉設備の開発～

Establishment of the Long-life-Technology of the BOF.
 ～Development of BOF, which enables continuous operation for over 20 years～

主森 哲朗* Tetsuro TONOMORI
 製鉄プラント事業部
 製鉄プラントエンジニアリング第一部
 商品技術室 製鋼・エコファーマス技術グループ

谷石 彦文 Hikohumi TANIISI
 製鉄プラントエンジニアリング第一部長

黒田 均 Hitoshi KURODA
 製鉄プラントエンジニアリング第一部
 プロジェクト管理室
 製鋼エコファーマスプロジェクトグループ

和田 利男 Toshio WADA
 NSプラント設計(株)
 製鉄プラントエンジニアリング部
 製鋼・エコファーマスチームチーフ

末永富士雄 Fujio SUENAGA
 NSプラント設計(株)
 シミュレーションエンジニアリング・
 ソリューション部チーフ

山口 正吉 Masayoshi YAMAGUCHI
 NSプラント設計(株)
 シミュレーションエンジニアリング・
 ソリューション部チーフ

抄 録

転炉とは高温の溶銑に酸素を吹付け溶鋼に変える設備で、その炉体は常に過酷な環境にさらされている。そのため、時間が経つにつれて鉄皮材質の劣化が進み、最終的には変形や亀裂が発生する。炉本体の交換は非常に高価なため、従前は鉄皮の部分補修により炉体の延命を図ってきた。しかし、補修作業と補修期間の操業停止による経済的損失が発生していたため、部分補修なしで長期連続運転可能な転炉設備の開発が期待されていた。本稿では転炉の長寿命化を可能にした新材料の開発と炉体構造の最適化について紹介する。

Abstract

A BOF is a facility that converts hot metal into molten steel by blowing oxygen. The converter shell is continuously exposed to very high temperature and therefore the material deterioration gradually progresses throughout its life. As the deterioration goes further, deformations or cracks occur in the shell steel. Since cost for replacement of entire converter is huge, local repair is usually applied. However, significant financial loss still remains due to prolonged shutdown during the repair and also the cost of repair work itself. Thus, the development of a BOF which enables continuous operation for a long time without repair was strongly anticipated. In this paper, as a solution for the above issues, the development of new material and optimization for the converter body structure are reported.

1 緒言

転炉とは約1600℃の溶銑に酸素を吹付け溶鋼に変える反応炉である。図1に設備概要を示す。炉体鉄

皮はトラニオンリングの内側に配置され、炉体鉄皮の熱膨張を吸収できる支持装置によってトラニオンリングと固定されている。炉体鉄皮の内側には耐火物が施工しており、使用経過に伴い、溶損し薄くな

る。耐火物は薄くなると交換するが、炉体鉄皮は長期間使用し続け、耐火物が交換される直前には炉体鉄皮の温度は約600℃まで上昇する場合もある。

このような過酷な環境下で使用されるため、徐々に炉体鉄皮の材質劣化が進み、熱変形や亀裂が生じていたが、部分補修を繰り返し行うことで、長期間(長いものでは20年間)の使用を可能にしてきた。この定期的な部分補修では、炉体鉄皮に付属する機器・部品の多くを取り外す必要があったため、1回の部分補修は多大な費用と期間を必要とし、さらにその間の操業停止に伴う生産量の減少による損失を生じさせていた。

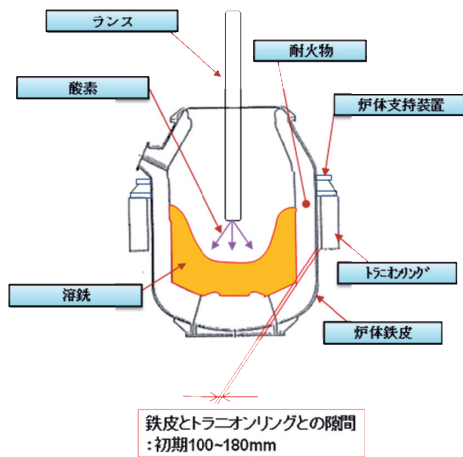


図1 転炉設備の概要
Fig. 1 Schema of BOF

このような背景の中、定期的な部分補修を必要としない長寿命化のニーズが大きく、当社は、このニーズに応えるため、(1)炉体鉄皮の熱変形抑制及び亀裂抑制が図れる「新材料」を旧新日本製鐵(株)(現新日鉄住金(株))と共同で開発し、(2)開発した新材料の機能を十分に発揮させるべく「転炉本体構造の最適化」を図った。これらにより転炉設備の長寿命化技術を確立した。

本稿では、長寿命化技術の確立に至るまでに開発・改良した内容について紹介する。

2 炉体鉄皮の熱変形及び亀裂抑制

2.1 新材質の開発

炉体鉄皮の熱変形及び亀裂を抑制するために、新材料の開発を新日鉄住金(株)と共同で行った。新材料の開発のポイントは以下の2点である。

- (1)熱変形の抑制：耐クリープ性を有すること。
- (2)亀裂の抑制：熱負荷後のじん性を有し、且つ、じん性の閾値は20年間(約17.5万時間)の連続使用にても初期欠陥が進行しないこと。

開発した新材料の高温強度、じん性は表1に示す。新材料(SEV295-mod)は従来材と比較して高温強度(降伏点)は約2倍、および熱負荷後のじん性は大幅に改善した。

表1 新材料と従来材の特徴比較
Table 1 Comparison between new and ordinary material.

項目	単位	従来材 SM400C	新材料 SEV295-mod	
高温特性 (at 600℃)	引張強さ	kgf/mm ²	27	32
	降伏点	kgf/mm ²	14	25
靱性	シャルピー吸収エネルギー (初期)	J	139	215
	シャルピー吸収エネルギー (600℃、200時間加熱後)	J	—	85

また、開発のポイントであった「熱変形の抑制」および「亀裂の抑制」の効果は以下の通りであった。

(1)熱変形の抑制の効果

熱変形の抑制効果は実炉に適用し、約20年間の稼働にて確認した。その結果は図2に示すように、従来材では約10年で150mm変形したのに対し、新材料では約20年間の使用で30~40mmと小さかった。これを変形速度に置き換えると新材料は、従来材と比べて約1/4の変形速度であり、熱変形の抑制に一定の効果があることがわかった。

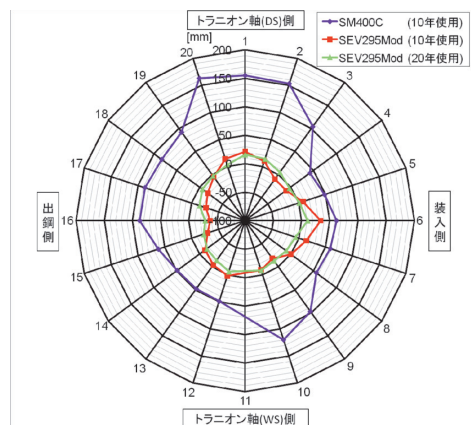
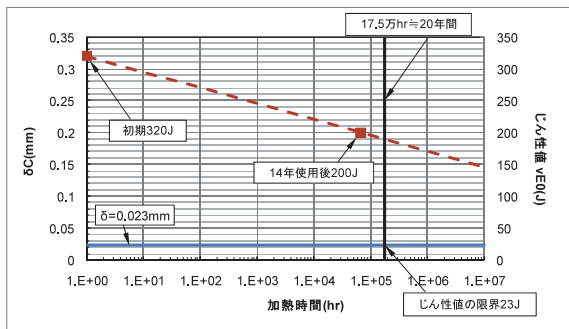


図2 炉体変形量の比較
Fig. 2 Comparison of the converter body deformation.

(2)亀裂の抑制の効果

亀裂の抑制効果は、約14年間使用した炉体鉄皮からサンプルを採取して確認した。亀裂が抑制されているかどうかの評価は、日本溶接協会の欠陥評価規格 WES2805の脆性破壊の危険評価方法により行った。この評価方法では材料が保有するじん性によって阻止出来る開口変位 δ_c を求め、その値が初期欠陥に実応力がかかったときに発生する開口変位 δ よりも大きければ、初期の欠陥以上に亀裂は進展しないとしている。この評価方法に基づき、採取したサンプルの評価結果を図3に示す。この結果により、限界以上のじん性を有しており、また、20年以上使用したとしても十分なじん性を有していると予測できる。



WES2805 溶接継ぎ手の脆性破壊の危険評価方法における計算式
 $\delta_c = 0.01 \times vE0$ 、 $\delta = 3.5 \times a' \times \epsilon$
 δ 、 δ_c の算出前提条件
 ・vE0 : 0°Cにおけるシャルピー吸収エネルギー
 ・ ϵ : 600°C熱間使用時の最大降伏歪
 ・a' : 等価貫通亀裂寸法

図3 炉体鉄皮の亀裂抑制評価
 Fig. 3 Evaluation of crack-suppressions on the shell steel.

2.2 新材料に適応した溶接材料の選定

新材料を開発した場合、当然それに適した溶接材料を選定する必要がある。溶接材料の選定にあたっては常温で母材(新材料)より機械的強度が高いことが条件となり、また、これに加えて以下の条件を有している必要がある。

- ・600°Cにおいて、引張強度は母材(新材料)よりも高いこと。
- ・熱負荷後のじん性を有すること、且つ、じん性の閾値は20年(17.5万時間)の連続使用で亀裂が進行しないこと。

一般的に溶接材料の常温における引張強度は公表

されているが、高温での引張強度ならびに熱負荷後のじん性は公表されていない。そのため当社にて、常温の引張強度を基に数種類の溶接材料を候補に挙げ、上記の条件を満足するか(1)高温引張試験、(2)シャルピー衝撃試験を実施した。これらの試験結果より溶接材料 A が条件を満足していることがわかった。この結果について述べる。

表2 溶接材の試験結果
 Table 2 Experiment of welding materials.

項目	単位	溶接材 A	母材 SEV295-mod	
引張強度	常温	kgf/mm ²	68	52
	高温(at 600°C)	kgf/mm ²	39	32
靱性	シャルピー吸収エネルギー(初期)	J	224	215
	シャルピー吸収エネルギー(600°C、200時間加熱後)	J	197	85

(1)高温引張試験結果

溶接材料 A は常温ならびに600°Cにおいて母材(新材料)より高い強度を有していることがわかった。

(2)シャルピー衝撃試験結果

溶接材料 A は初期(溶接のまま)では224J、600°C×200時間熱負荷後では197Jを有しており、低下が小さかった。

また、亀裂が進行するかどうかの評価は、先に述べた2.1項同様に WES2805の脆性破壊の危険評価方法により実施した。この結果を図4に示す。この結果より20年後(17.5万 hr)のじん性値は、初期欠陥に応力がかかった時に発生する開口変位 δ よりも大きいことが認められ、20年以上使用しても初期欠陥に起因する亀裂は進展しないと予想できる。

以上の結果から溶接材料 A は新材料(SEV295-mod)に適していることがわかり、以後新材料の溶接材料として標準とした。

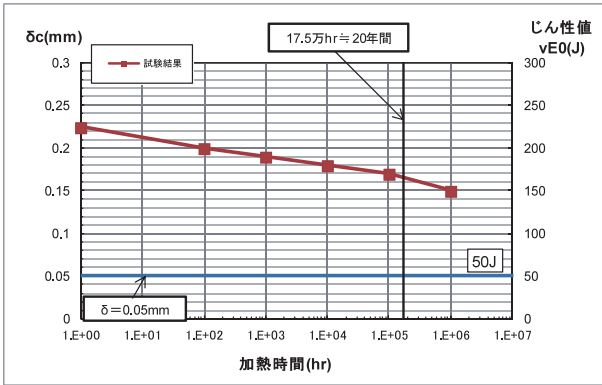


図4 溶接材料の亀裂抑制評価
Fig. 4 Evaluation of crack-suppressions for welding materials.

3 転炉本体構造の最適化

転炉炉体は各製鉄所において、処理能力(炉容)に差異があるため、そのサイズは多様である。当社は、開発した新材料を実機に適応し、20年以上の寿命が確保できることを実績炉で確認したが、サイズの異なる転炉炉体においても、同様の効果を発揮させる為には、その効果を定量的に把握できる手法を確立する必要があった。そこで、転炉炉体の状態をシミュレートできる手法として3次元FEM解析手法を確立した。この解析手法によって新材料の範囲、冷却範囲、および転炉本体構造の最適化が図れるようになった。また、この手法を用いて転炉本体構造で特徴的な炉体支持装置を最適化した事例についても紹介する。

3.1 3次元FEM解析手法の確立

本解析の手法、及び本解析によって得られた結果を実績炉と比較し妥当性を確認した結果を以下に述べる。

(1) 3次元FEM解析の手法

本解析の概要を図5に示す。また、実績炉の使用状況に近付けるため、境界条件の設定に下記を反映した。

- ・鉄皮の温度が実炉より得られた温度と合うように鉄皮と大気間の熱伝達係数を設定した。(図6)
- ・変形を正確に把握するために温度ごとに実材料の引張試験結果から得られたデータを織り込み、また、クリープ変形量を正確に算出するため新材料のクリープひずみ速度を設定した。
- ・実際の操業では耐火物は徐々に損耗し、1炉代

目、2炉代目、と定期的に耐火物を交換するが、鉄皮は継続使用するため、耐火物厚みの減肉パターンを設定した。(図7)

- ・鉄皮には耐火物の膨張圧力がかかるが、耐火物厚みによって変わるため、耐火物厚みに応じた膨張圧力を計算する。
- ・鉄皮の熱変形は塑性変形・クリープ変形により生じるが、塑性変形では耐火物1炉代目でほとんど終え、2炉代目以降の熱変形はクリープ変形が支配的であり、熱変形速度は耐火物の1炉代目と2炉代目以降で大きく異なる。従って、長期間使用後の熱変形量を推定するには熱変形速度が一定となる3炉代目まで連続で解析を行った。3炉代目までの解析イメージは図8に示す。

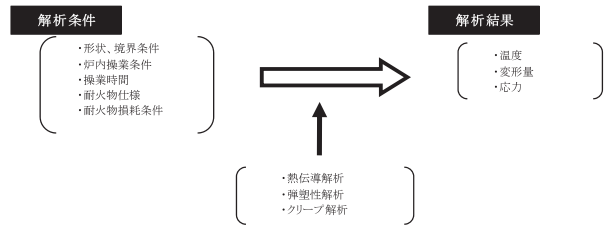


図5 3次元FEM解析のフロー
Fig. 5 Schema of three-dimension FEM analysis.

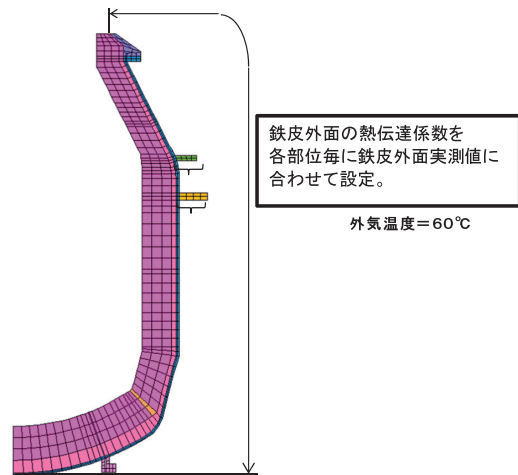


図6 熱伝達係数の設定
Fig. 6 Setting of heat transfer coefficient.

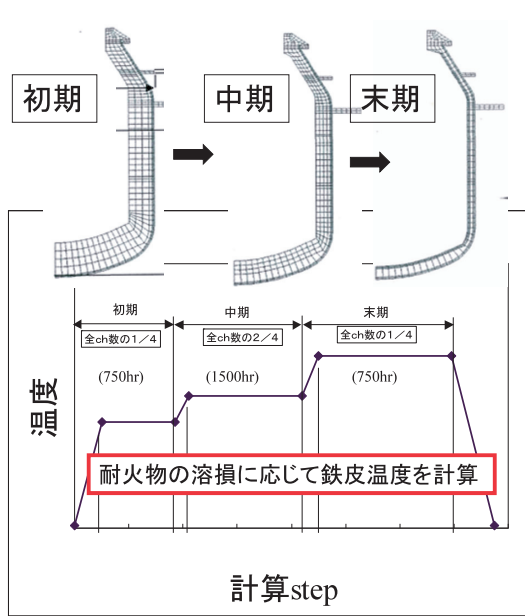


図7 耐火物の減肉パターン
Fig. 7 Wearing pattern of refractory.

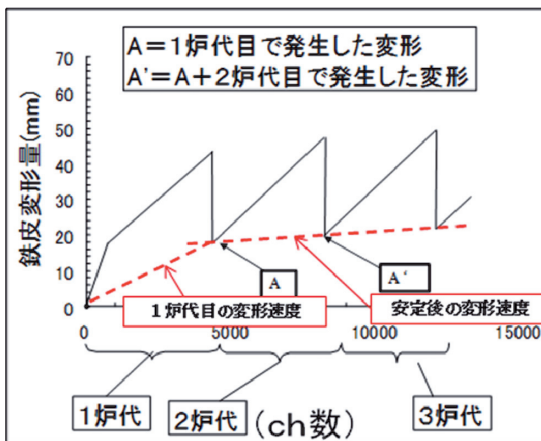


図8 3炉代解析のイメージ
Fig. 8 Image of three-cycle analysis upon replacing refractory.

(2)解析手法の妥当性の確認結果

本解析によって得られた結果において、炉体鉄皮の変形速度は $0.34 \times 10^{-3} \text{ mm/ch}$ であった。また、新材料を実炉へ適応した変形速度は $0.32 \times 10^{-3} \text{ mm/ch}$ とほぼ合致しており、本解析の妥当性を確認できた(図9)。

以上により、変形による寿命予測、応力・温度の定量把握が可能となり、炉体鉄皮の新材料の範囲、冷却範囲および転炉本体構造の最適化を図れるようになった。

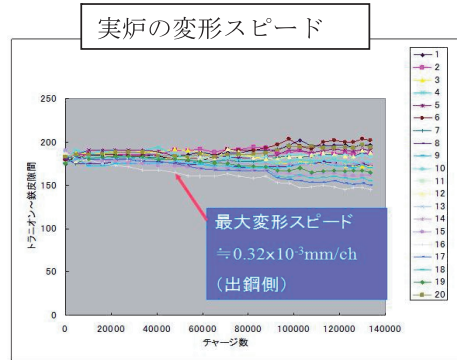
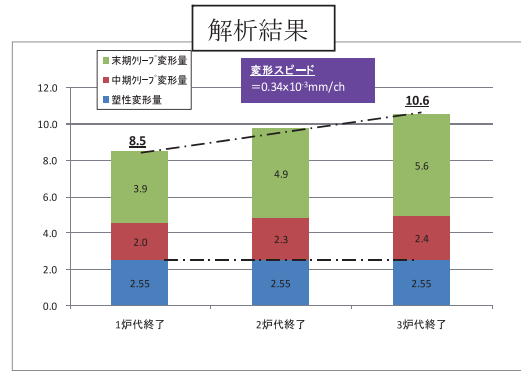


図9 解析結果および実炉の変形スピード
Fig. 9 Deformation speed in analysis, and actual furnace.

3.2 炉体支持装置の最適化

転炉の支持装置は各エンジニアリング会社において、それぞれ特徴を持ったものを保有している。当社の炉体支持装置は従来、熱変形吸収を主とした機能として、炉容250ton/ch以上の大型転炉には「3点支持ピンボルト方式」を採用してきたが、構造が複雑であり、かつその複雑さが故に高価であるという課題があった。

当社はこの課題を解決するために、大型転炉の炉体支持装置にシンプルで安価にするべく、従来100~200ton/chクラスの中・小型転炉に採用してきた「多点ブラケット・コッター方式」を適用した。炉体支持装置の各々の方式の特徴を図10、及び図11に示す。

多点ブラケット・コッター方式の大型転炉への適用にあたり、先に述べた3次元FEM解析手法を用いてその性能を評価した結果、20年以上の寿命を発揮できることがわかり、その適用事例を増やしている。現在までに250ton/ch以上の大型転炉へ適用した実績を表3に示す。

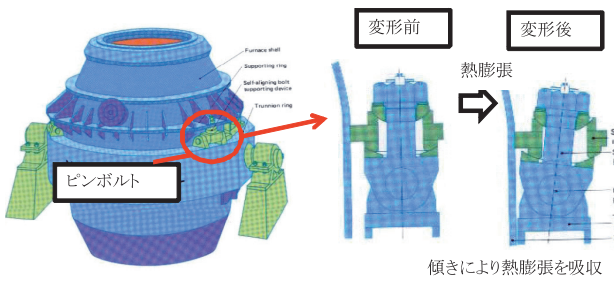


図10 炉体支持装置（3点支持ピンボルト方式）
Fig.10 Image of the supporting device (Three-points support pin bolt type).

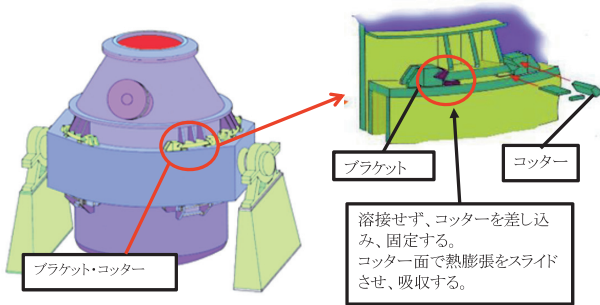


図11 炉体支持装置（多点ブラケット・コッター方式）
Fig.11 Image of the supporting device (Multi-points bracket and cotter type).

表3 250ton/ch以上の大型転炉への「多点ブラケット・コッター方式」の適応実績
Table3 Supply record of application of “multi-points bracket and cotter type” for BOF of 250 ton/ch or more.

		炉容 (ton/ch)	基数	稼働開始	炉号 (No.)
1	加古川製鉄所 第1製鋼工場 株神戸製鋼所	270	1	2006	No.3
2	八幡製鉄所 第3製鋼工場(T鋼) 新日鉄住金株	350	1	2011	No.2
3	君津製鉄所 第2製鋼工場 新日鉄住金株	300	2	2012	No.1&2
4	八幡製鉄所 第3製鋼工場(T鋼) 新日鉄住金株	350	1	2012	No.1
5	加古川製鉄所 新溶銹処理工場 株神戸製鋼所	270	1	建設中	

4 結言

(1)熱変形抑制及び亀裂抑制が図れる「新材料」の開発および、(2)転炉本体構造の最適化が図れる3次元FEM解析手法の確立について述べた。これらにより長寿命化技術の確立が図れ、20年以上連続稼働可能な転炉設備を開発することができた。また、この確立した技術は既に数機に適用し、現在も順調に稼働中である。

今後も当社は開発した長寿命化技術を駆使し、顧

客ニーズを満足する最適な設備、およびLCA改善の提案をしていく。