平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「超々臨界圧ボイラー用次世代材質鍛鋼品の製造条件確立」

研究開発成果等報告書

平成22年 3月

- 委託者 近畿経済産業局
- 委託先 シモダフランジ株式会社

目 次

第1章 研究開発の概要 3	_
I — 1. 研究開発の背景・研究目的及び目標 3	_
I – 2. 研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	_
I - 3. 成果概要 4	_
I-4. 当該研究開発の連絡窓口 5	_
第2章 本論 6	_
Ⅱ. 超々臨界圧ボイラー用次世代材質鍛鋼品の製造条件確立	_
Ⅱ-1. 鍛造条件確立 6	_
Ⅱ-1-1. 研究開発対象材質の選定及び素材調達	_
Ⅱ-1-2.入手素材-7	_
Ⅱ-1-3. 鍛造品の試作 8	_
Ⅱ-1-4. 試作鍛造品の熱処理 12	_
Ⅱ-1-5.切削テスト 15	_
Ⅱ - 1 - 6 . 試作品性状調査 17	_
Ⅱ-1-7. 研究成果のまとめ 28	_

第1章 研究開発の概要

I-1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

<研究背景>

従来の火力発電プラントでは発電用蒸気タービン入り口での蒸気温度が 600℃前後で あり、世界の中では日本のプラントが最も高い温度での技術を有している。しかし CO₂排 出量の大幅な低減や発電効率の向上を目指し、蒸気温度 700℃となる超々臨界圧ボイラー の開発が世界の流れとなっており、わが国でも現在国の材料開発機関と大手重電機メーカ -3 社及び大手鉄鋼メーカー1 社による実施体制で先進超々臨界圧ボイラーの開発を進め ている。また、このような超々臨界圧条件に対応できる部材は、石油・化学プラント、産 業機械、造船、宇宙産業関連部品等、幅広いニーズがある。

国策として進められている超々臨界圧ボイラーの開発が完了すれば、当該ボイラーに使用される鍛鋼品部品類にも同等の品質が要求されることは明らかであり、規格化を視野に入れた鍛鋼品の開発を事前に実施しておくことは重要と考え、超々臨界圧ボイラー用次世代材質鍛鋼品の製造条件の確立を図ることとした。

<研究目的及び目標>

欧州ですでに超々臨界圧ボイラー用パイプ材として規格化されている材質、

"規格名:EN10216-2 材質名:7CrMoVTiB10-10 及び X10CrWMoVNb9-2"

を引用し、鍛鋼品製造条件確立のための下記技術課題をクリアにすることとした。

- 素材の溶製難易度
- ・ 鍛造性
- 熱処理条件
- ・切削性

上記技術課題をクリアにするため、本研究では下記を実施。

1) 鍛造条件確立への対応

EN10216-2 規格に規定されている材質名、7CrMoVTiB10-10 及び X10CrWMoVNb9-2 の両材質 鍛造用素材(ビレット)を国内製鋼メーカー並びに欧州製鋼メーカーから購入、当該材を 使用して試作鍛造を実施し鍛造に係る諸データを採取。

2) 熱処理条件及び切削条件確立への対応

上記 1)で製作した試作鍛造品を用いて肉厚を変えての最適熱処理条件確立テスト(性状

調査含む)及び量産を考慮した大断面鍛鋼品における熱処理テスト並びに性状調査を実施。 更に現有材との切削性を比較するため熱処理まで施工した試作鍛造品を用いて切削テス トを実施。

I-2.研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

研究組織・管理体制



研究者氏名

シモダフランジ株式会社	木原	雅充	取締役 品質保証部長
	柏	孝之	品質保証部 品質管理課長
	竹平	元則	製造部 製造課長
	上谷	昌史	品質保証部 生産技術課

協力者

株式会社 山下鍛造所	山下	幹博	取締役 製造部長
東伸熱工株式会社	上瀧	春二	取締役
株式会社 IHI検査計測	小畠	豊	試験・分析グループ課長

管理

シモダフランジ株式会社 木原 雅充 取締役 品質保証部長

I-3. 成果概要

本研究開発により、次のような成果を得ることが出来た。

1) 鍛造条件の確立

① 残念ながら予定していた 7CrMoVTiB10-10 欧州製素材が欧州製鋼メーカーの事情によ

り入手不可能となり、国産材との比較調査を断念せざるを得なくなったが、国産材での7CrMoVTiB10-10材での試作鍛造並びにX10CrWMoVNb9-2材による欧州材と国産材の 試作鍛造比較は実施できた。

- ② 7CrMoVTiB10-10 並びに X10CrWMoVNb9-2 材共に試作鍛造品程度のボリュームを有する 製品の鍛造条件確立の目途はついた。今後の課題としては試作鍛造品以上の大断面品 及び複雑形状品についても確認する所存である。
- 2) 熱処理条件及び切削条件確立への対応
 - 7CrMoVTiB10-10 並びに X10CrWMoVNb9-2 材共に規格要求強度を満足する熱処理条件を 見出すことができた。今後、当該試作品を使用して長時間クリープ試験を実施し、最 終的な評価を下したいと考える。
 - ② 性状調査の結果では熱処理時の肉厚による若干の組織、強度差は見受けられるも概ね 規格要求品質を満足することが出来た。
 - ③ 切削テストは試作ブロック3個の内、X10CrWMoVNb9-2国産材のみしか完了できなかったが、旋盤加工、フライス加工、ミーリング加工等の各種切削条件を見出すことができた。今後引き続き他の2ブロック(X10CrWMoVNb9-2欧州材、7CrMoVTiB10-10国産材)の切削テストを継続実施し、最適加工条件を確立する。
- I-4. 当該研究開発の連絡窓口

 シモダフランジ株式会社 取締役 品質保証部長 木原 雅充 連絡先 TEL. 0791-22-2211
FAX. 0791-22-2216

第2章 本論

- Ⅱ. 超々臨界圧ボイラー用次世代材質鍛鋼品の製造条件確立
 - Ⅱ-1. 鍛造条件確立
 - Ⅱ-1-1. 研究開発対象材質の選定及び素材調達

当社が製造する発電ボイラー用鍛鋼部品で高温、高圧化で使用されるものとしては、 主蒸気管用Yピース、ラテラル、Tピース及び特殊フランジ等の継手類があり、現状主 として 500℃~600℃の設計温度範囲で 2.25%Cr-1%Mo 系(設計温度 500℃~550℃)の材 料と、9%Cr-1%Mo 系(設計温度 550℃~600℃)の材料が使用されている。

欧州では既にこれらの改良型材質がボイラー用高圧パイプ材として EN10216-2 にス ペックインされており、鍛鋼品規格としてもいずれ EN 規格にスペックインされること は間違いないと考えられる。

(従来材)		(改良型)	(EN10216-2 登録材質名)
2.25%Cr-1%Mo 系	\rightarrow	2.25%Cr-1%Mo-0.25%V+Ti+B 材	7CrMoVTiB10-10
9%Cr-1%Mo 系	\rightarrow	9%Cr-1.8%W-0.2%V+Nb 材	X10CrWMoVNb9-2

X10CrWMoVNb9-2 材は「発電用火力設備の技術基準」に火 SFVAF29 材として、 ASME Sec. IIには SA-182 Gr. F92 材として相当材質が登録されているが、設計許容応力 を求めるためのクリープ試験の時間に対する考え方の違いから欧州圏内での採用には PED (欧州圧力容器指令)に従った厳しい条件が付与されているのが現状である。

以上のことから本研究開発の対象材として、7CrMoVTiB10-10 と X10CrWMoVNb9-2 を選定し、欧州製と国産の2種類の鍛造用素材(ビレット)を調達することとした(表1参照)。

下記の調達予定に対し、ドイツ BGH 社に依頼した 7CrMoVTiB10-10 材については先方の操業事情及び当方の要求(工期並びに狙い化学成分値)に対応できない等の理由で入手することができず、当該材質については欧州材と国産材の比較という目的を断念せざるを得なくなった。

材質名	欧州製素材調達先	国産素材調達先		
7CrMoVTiB10-10	ドイツ BGH 社(入手できず)	住友金属工業㈱ 関西製造所殿		
X10CrWMoVNb9-2	ドイツ BGH 社	当社保有在庫品使用		

表1 本研究開発の対象材と調達先

本研究開発のために入手した鍛造用素材の概要を表 2.1 及び表 2.2 に示す。

表 2.1 7CrMoVTiB10-10 化学成分值 (wt.,%)

区分	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Mo	
相攻佔	0. 05	0. 15	0. 30	0. 020	0.010	2. 20	0.90	
况恰1但	∼ 0. 10	∼ 0. 45	∼ 0. 70	以下	以下	∼ 2.60	∼ 1.10	
入手材 実績値	0. 10	0. 34	0. 49	0. 015	0. 004	2. 43	1. 02	

素材主寸法: φ500×6700L

AI	Ti	V	Ν	в
 0. 020	0. 05	0. 20	0.010	0. 0015
以下	∼ 0. 10	∼ 0.30	以下	∼ 0. 0070
0. 010	0. 10	0. 28	0. 0084	0. 0046

表 2.2 X10CrWMoVNb9-2 化学成分值 (wt.,%)									
区分		С	Si	Mn	Р	S	Cr	Mo	
+8	妆店	0. 07	0. 50	0. 30	0. 020	0. 010	8. 50	0. 30	
况俗但 		∼ 0. 13	以下	∼ 0.60	以下	以下	~ 9.50	∼ 0.60	
入手材	欧州材	0. 11	0. 34	0. 50	0. 019	0. 001	8. 90	0. 51	
実績値	国産材	0. 11	0. 26	0. 50	0. 009	0. 001	8. 90	0. 38	

Ni	AI	Nb	V	Ν	В	W
0. 40	0. 040	0.04	0. 15	0. 030	0. 001	1.50
以下	以下	∼ 0. 09	∼ 0. 25	∼ 0. 070	∼ 0.006	∼ 2.00
0. 32	0. 005	0. 080	0. 19	0. 055	0. 0030	1. 685
0. 17	0. 010	0.060	0. 19	0. 051	0. 0030	1.850

素材主寸法: φ515×6435L(欧州材)

φ 500 × 5000L(国産材:当社保有在庫品)

Ⅱ-1-3. 鍛造品の試作

1) 本研究開発の調査目的並びに入手素材の変更を勘案した試作鍛造品の明細を表3に 示す。

X	部本日的	=+ <i>U</i> - □□ 4m	7CrMoVTiB10-10 X10CrW		oVNb9-2
分	調査日的	高式、TFP57 和国 	国産材	国産材	欧州材
A	最適鍛造条件、 最適熱処理条件設定 用基礎調査鍛造品	肉厚3条件×鍛錬比2条件×熱処理2条件の計1 2条件の調査用ブロックが採取可能な鍛造丸棒 (1素材当りφ360×1400L×2本)	_	0	0
В	製品性状確認用 鍛造品	実際に過去のボイラーに使用された鍛鋼品継手を 考慮した大断面ブロックを製作 (1素材当り500角×700L×1個)	0	0	0
С	切削条件設定用 鍛造品 (5 軸加工対象品)	最も加工が困難な主蒸気分岐用継手(Y形又はラ テラル継手)を削り出すための鍛造ブロック製作 (1素材当り 500 角×700L×1 個)	0	0	0

表 3 試作鍛造品明細

2) 試作鍛造区分毎の工程フローを図1に、鍛造手順図を図2に示す。

<図1 作業フロー>







(鍛造ブロック区分C)



<図2 鍛造手順図>

(i) 鍛造ブロック区分A

※()内数値は5S相当の場合の寸法及び鍛錬比を示す。



< 鍛造終了後の外観写真>



表A 鍛造丸棒試作数量

称许日日	ᄴᄅ	统、生→:+	特性			
	致重		材質	メーカー	鍛錬比	
A-3S-国産材	1	ϕ 360 × 1400L		国产社	3 S 相当	
A-5S-国産材	1	ϕ 360 × 1400L		国性的	5S相当	
A-3S-欧州材	1	ϕ 360 × 1400L	ATOGEWMOVIND9-2	欧州材	3 S相当	
A-5S-欧州材	1	ϕ 360 × 1400L			5 S 相当	

(ii)鍛造ブロック区分B、C

※ 区分B、Cの鍛錬成形比は鍛鋼品の最低水準3S相当とした。







<鍛造終了後の外観写真>



表B 鍛造ブロック試作数量

ᇭᄮᆸᆸ	粉旦	₩,,年十;十	特	生
城垣前日	<u> </u>		材質	メーカー
B1	1	500 角 × 700L	7CrMoVTiB10-10	国産材
B2-J	1	500 角 × 700L		国産材
B2-D	1	500 角 × 700L		欧州材
C1	1	500 角 × 700L	7CrMoVTiB10-10	国産材
C2–J	1	500 角 × 700L		国産材
C2-D	1	500 角 × 700L		欧州材

3) 試作品の鍛造作業条件及び結果を以下に示す。

鍛造実施場所	:	㈱山下鍛造所
使用設備	:	同社保有 川崎油工㈱製 1500T 油圧プレス
鍛造方法	:	自由鍛造
加熱温度	:	1,200℃~1250℃(実績値 1230℃)
鍛造終了温度	:	850°C以上(実績値 870°C)
鍛造後の処置	:	7CrMoVTiB10-10;放冷
		X10CrWMoVNb9-2;炉冷
鍛造作業結果	:	両材質共に目標寸法、形状に鍛造することができた。
		鍛造作業結果を表4に示す。

表 4 鍛造作業結果

材質項目	7CrMoVTiB10-10	X10CrWMoVNb9-2
最終打ち上がりま でのヒート回数	区分B、C:4回	区分A : 5回 区分B、C:4回
従来材質に比して の鍛造性	熱間加工性については特に 問題無く、従来材とほぼ同 等。	従来材に比して硬くやや変 形抵抗が大であるが、作業性 が悪化するほどではない。上 金型の掛け幅を十分にとり、 ゆっくりと加圧すれば従来 材と同等の成形性は確保で きる。

Ⅱ-1-4. 試作鍛造品の熱処理

1) 肉厚別ブロックの切り出し

熱処理効果の把握をするため、鍛造区分Aのブロック(φ360×1400L)各々1本 から肉厚を変えた表5に示す6個の熱処理試験材を鋸切断で採取した(区分B、C ブロックについては鍛造のまま熱処理施工)。

鍛造区分Aの切断寸法図を図3に示す。

形状記号	熱処理寸法	数量	熱処理区分	
A1	75T × 150W × 300L	2	N-T 及び Q-T 用各 1 個	
A2	100T × 200W × 300L	2	N-T 及び Q-T 用各 1 個	
A3	150T × 300W × 500L	2	N-T 及び Q-T 用各 1 個	

表5 1本の鍛造丸棒から切り出す試験片数量

<図3 鍛造区分Aの切断寸法図>



(a-a 断面図)



2) 熱処理施工条件

鍛造区分Aのブロックから採取した肉厚を変えた熱処理試験材を用いて N-T (焼ならし-焼戻し)及び Q-T (焼入れ-焼戻し)の2種類の熱処理を施し、その結果を踏まえた最適熱処理条件において鍛造区分B及びCブロックの熱処理を施工する予定であったが、時間的に余裕がないことから鍛造区分B及びCブロックについては Q-T に決めつけて施工することとした (7CrMoVTiB10-10 材の区分B、Cブロックも同様に Q-T のみ施工)。

図4に熱処理パターンを示す。

<図4 熱処理パターン>



(参考)焼戻し時間一般式

区分A:T=150 0.5Hr×150/25=3.0Hr 区分B、C:T=500 0.5Hr×500/25=10.0Hr 3) 試作品の熱処理作業条件及び熱処理後の表面硬さを以下に示す。

熱処理作業実施場所 : 東伸熱工(株) 東大阪工場使用設備 : 同社保有 NKテック(株製 133 号及び 134 号

焼入れ・焼戻し炉(ガス炉)

<図5 熱処理作業状況写真>

温度管理方法

: 炉に設置された熱電対による雰囲気温度、並びに試験 材に埋め込んだ熱電対による実体温度管理

熱処理後の硬さ

: 試験材の熱処理後の表面硬さ測定結果を表 6.1 及び表 6.2 に示す。

衣 0.1	報道区分Aの熟処理後の衣面	使 ご 測 正 箱 未	(ПD)

ロハッの劫加四後のキモはと別白針田

		国産材			欧州材		
		A1	A2	A3	A1	A2	A3
N_T ++	3 S	255	255	248	248	248	241
N-1 14	5 S	248	255	255	255	262	248
Q-T 材	3 S	241	248	248	241	248	248
	5 S	241	248	241	241	248	235

表 6.2 鍛造区分Bの熱処理後の表面硬さ測定結果 (HB)

		国産材	欧州材		
B1	7CrMoVTiB10-10	Q-T 材	3S	192	-
B2	X10CrWM0VNb9-2	Q-T材	3S	239	240

※ 鍛造区分Cブロックは切削テスト用につき、硬さ測定を省略。

Ⅱ-1-5. 切削テスト

1) 切削テスト対象品の選定

切削テスト用に製作した鍛造区分Cを用いて切削テストを実施した。どの様な形 状のものを切削するかの選択に当たり、過去に当社で製作した実績のある製品の中 から主蒸気リード管用Yピースを選定した。

当該品はフライス加工、旋盤加工、ミーリング加工、穴明け加工等の機械加工の 要素が全て含まれるため、本研究開発に妥当と考えた。

2) 使用設備(全てシモダフランジ株式会社保有設備)

設備名項目	MPC-4150B	TM-12M	e-1850V
加工能力(mm)	$4000W \times 5000L \times 2400H$	ϕ 1500 × 1540H	ϕ 2300 × 1800H
テーブル径(mm)	4000W×5000L	φ 1250	φ 2000
製造メーカー名と 機種分類	東芝機械 マシニングセンター	オーエム製作所 堅型旋盤	ヤマザキマザック製 5 軸複合マシニングセンター
加工担当工程	ブロック 6 面の鍛造 肌除去のためのフラ イス加エ 母管部下穴加工	母管部外径及び内径部 仕上加工	分岐用枝管部外、内径部荒加 エ及び仕上加工
加工順	1	2	3

表7 機械加工の設備一覧

3) 切削加工作業

枝管加工時の写真及びYピースの完成写真を図6に示す。今回の切削テストでは最 適条件設定のためやや慎重になりすぎ、従来材に比して比較的ゆるい条件で加工した が、予想されたチップの早期摩耗や欠損は発生せず従来材と同一条件に上げても切削 加工は問題ないと判断した。Ni合金等の難削材に比べはるかに量産化へ向けての対応 はし易いと考える。

引き続き切削テストを継続し、更なる難易度の高い機械加工を試みる所存である (例:曲面加工又は内周面交叉部のR加工等)。

<図6 切削テスト写真>



(c)枝管外径部加工



(d) 枝管内径部加工











Ⅱ-1-6. 試作品性状調査

 肉厚の差並びに冷却速度差による熱処理効果を調査するため、鍛造区分Aブロック から採取した熱処理試験材と量産製品を想定して鍛造した大断面ブロック(鍛造区 分B)において表8の性状調査を実施した。
各試験の結果を図7、図8及び表8、表9に示す。なおミクロ組織写真は代表的な位 置のみを載せる。



<表8 熱処理試験材毎の性状調査項目及び試験位置>

*1 参考試験は規格での要求が無いことを表す。



<図7 区分A 機械試験の各種データ比較>



<図7 続き>









試験	十区分		A3-3S-QT-J	
検鏡位置		1	2	3
組織	× 50			
写真	× 400			

表9 鍛造区分A3の組織写真

(表9 続き)

試験片区分			A3-5S-NT-J	
検鏡位置		1	2	3
組織	× 50			
写真	× 400			

試験ፆ	十区分	A3-5S-QT-J			
検鏡位置		1	2	3	
組織	× 50				
写真	× 400				

(表9 続き)

試験片区分			A3-3S-NT-D	
検鏡位置		1	2	3
組織	× 50			
写真	× 400			

試験	十区分	A3-3S-QT-D			
検鏡位置		1	2	3	
組織	× 50				
写真	× 400				

(表9 続き)

試験片区分		A3-5S-NT-D			
検鏡位置		1	2	3	
組織	× 50				
写真	× 400				

試験片区分		A3-5S-QT-D			
検鏡位置		1	2	3	
組織	× 50				
写真	× 400				











※ L, W, T は試験片採取方向を示す。
B1:7CrMoVTiB10-10 製ブロック
B2:X10CrWMoVNb9-2 製ブロック
(J:国産材 D:欧州材)

80

<図8 区分B 機械試験の各種データ比較>

表10 鍛造区分日の組織写真



試験片区分		B2–J			
検鏡位置		1	2	3	
組織	× 50				
写真	× 400				

(表10 続き)



以上の調査結果から下記のことが言える。

i)機械的性質

肉厚を変えて2種の熱処理方法で処理した区分Aの試験材については N-T、 Q-T 共に耐力、引張強さは肉厚に関係なく規格要求値に対し十分な強度を有し ているが、肉厚の増加と共に伸びが不安定となり、特に最大肉厚 150t では欧州 材、国産材の区別なく主鍛錬方向の直角方向から採取した試験片で大幅な規格 値下限外れを起こしている。耐力及び引張強さ下限値に対し余裕があるので、 焼戻し温度を上げ強度を下げてやれば伸び値も安定するものと考える。区分A 試験材において肉厚 75t~150t の間では特に N-T、Q-T の違いで優位さは見られ ない。

又、区分日の製品を想定したブロックの機械的性質については、 7CrMoVTiB10-10材はL、W、Tの3方向全て規格要求値を十分にクリアしてお り全く問題ない。X10CrWMoVNb9-2材は区分A試験材と同様伸び値が規格要求値 下限ぎりぎりとなっているが、耐力、引張強さが規格要求下限値に対し余裕を もっているため、焼戻し温度を上げ、強度を低下させることで解決できるもの と考える。区分日の大断面ブロックにおいても十分な焼入れ性能を有している 事が判明した。 ii) 各部のミクロ組織

ミクロ組織については区分A及び区分B試験材いずれも表面からの深さ方向 に向けて当然のことながら若干の組織変化は見受けられるが、概ね下記のよう になっている。

- 区分A試験材 : 表面部(マルテンサイト)→1/4t部(マルテンサイト +ベイナイト)→肉厚中央部(ベイナイト+一部パー ライト)
- 区分B試験材 : 表面部(マルテンサイト)→1/4t部(ベイナイト)→ (X10CrWMoVNb9-2) 肉厚中心部(ベイナイト+パーライト)

区分B試験材 : 表面部(ベイナイト)→1/4t部(ベイナイト+パーラ (7CrMoVTiB10-10) イト)→肉厚中心部(ベイナイト+フェライト+パー ライト)

いずれの検鏡位置においても当該成分材の鍛造品として良好な組織を呈して いる。

Ⅱ-1-7.研究成果のまとめ

本研究開発は国策として進められている超々臨界圧ボイラーの開発のあかつきには、 当社が製造販売している従来ボイラー用鍛鋼品継手類にも同等の品質が要求されるで あろうと考え、将来の規格化を視野に入れ先行して次世代材質での製造条件確立を狙っ たものである。

今回の研究開発試験の実施の成果として次の項目を上げる。

- 7CrMoVTiB10-10 及び X10CrWMoVNb9-2 の両材を使用しての鍛造品製作は現状保有 設備で可能(鍛造、熱処理、機械加工)。
- 今回試作したものより大きい断面のものについては若干の検討を要すが、今回の 研究開発結果の水平展開で対応できる。即ち製造条件の確立はできたと言える。

今回の結果は発電用ボイラーに限らず、石油、化学プラント、産業機械等の高温、高 圧条件下で使用される部材にも幅広く適用できるものと考える。