

技術報告

大型厚肉フェライト系球状黒鉛鑄鉄の実体強度保証

糸藤 春喜* 清中海 舟*



糸藤春喜 清中海舟

Review Paper
J. JFS, Vol. 80 No. 2 (2008) pp. 113 ~ 119

Guarantee of Mechanical Properties in Ferritic Spheroidal Graphite Iron Castings with Heavy Section

Haruki Itofuji* and Kaishuu Kiyonaka*

キーワード: 球状黒鉛鑄鉄, フェライト系, 厚肉鑄物, 実体強度, 肉厚感受性, 保証, 黒鉛球状化理論, サイト説

1. はじめに

近隣諸国とのコスト競争が激化する中で、球状黒鉛鑄鉄(以下FCDとする)の実体強度保証技術が可能になれば、大きな品質の差別化となる。更に、この実体強度保証は、新たに鑄鋼(SC)のFCDへの代替を促進する際に、機械設計上の重要な技術となる。しかし、実体強度の保証は、鑄造品が大型厚肉になるほど、達成が困難となる。肉厚感受性に大きく起因し、実体強度に影響を及ぼす欠陥としては、表1aに示すマイクロ欠陥²³⁾及び表1bに示すマクロ欠陥の存在が考えられる。

実体強度に対する肉厚感受性の問題を解決するため、現

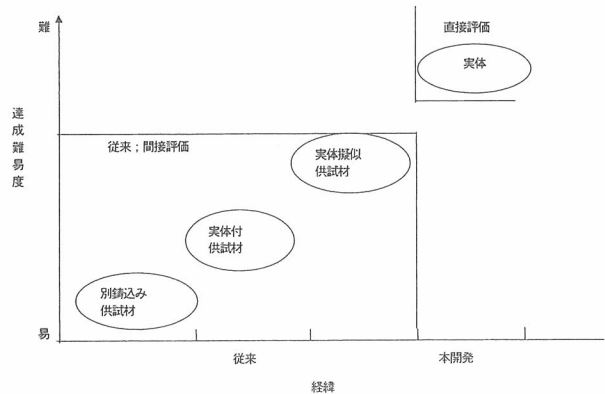


図1 実体強度の保証形態とその達成難易度

表1-a 実体強度に影響を及ぼすマイクロ欠陥

欠陥の種類	発生因子
球状化不良 (全体、表層)	化学成分 (Mg)、不純物 (S, Ti, Bi, Sb, As, Pb, Sn 等)、接種、肉厚 (凝固時間)、二次酸化、浸硫、鑄型ガスの吹込み、スーパーヒート
粗大黒鉛粒	肉厚 (凝固時間)
糸くず状黒鉛 (セル間)	肉厚 (凝固時間)、不純物 (As, Bi, P, Pb, Sb)
チャンキョ黒鉛 ²³⁾	化学成分 (Si, Ni, RE, Mg)、肉厚 (凝固時間・圧力)
黒鉛ドロス	化学成分 (CE)、肉厚 (凝固時間)
炭化物 (板状、セル間)	化学成分 (Mn, Cr, Mo, V, Mg 等)、接種、冷し金・肉厚 (凝固時間)
ステダイト	接種、P量、肉厚 (凝固時間)
ポロシティ (セル間集)	化学成分 (Mg)、炭化物生成、締付け、鑄型壁移動

表1-b 実体強度に影響を及ぼすマクロ欠陥

欠陥の種類	発生因子
引裂 (内、外)、ふくれ	化学成分 (C, Si, CE)、押湯方案、鑄型プロセス、鑄物の形状・寸法、締付け、鑄込み条件、鑄型壁の移動、中子の浮上、湯流れ
Mg ドロス (塊状、線状)	化学成分 (Mg, Al, Ca)、鑄込み条件、取組の性状、掛けせきの構造、二次酸化 (キャビティ内雰囲気、型内湯流れ)
ガス欠陥 (ブロー状、引裂状)	鑄型プロセス (lg.Loss)、塗型、型内湯流れ、鑄物の形状・寸法、乾燥
カン玉、湯じわ	型内湯流れ (せき、鑄込み姿勢)
異物カミ (砂、塗型、漏口燻瓦)	型くずれ・清掃、塗型の厚み、治具の遺忘れ、燻瓦の破損、未溶解接種剤
欠肉、寸法不良	型くずれ、伸尺 (鑄物形状)、鑄型強度 (変形、拘束)、鑄型壁の移動、中子の浮上、入干
焼着、浸透	鑄型の耐火度・充現度・強度・lg.Loss・乾燥、湯流れ、湯温
脆化割れ	化学成分 (Si, P, Mg)、高応力下で700K付近徐冷
成長 (寸法不良)	フェライト化処理

場技術への黒鉛球状化理論「サイト説」^{1~3)}の適用を試みた。その結果、実体強度の保証を可能とした「セオリダクタイル鑄鉄 (商標)」の開発に成功した。以下に、その保証の根幹をなす理論と保証事例を紹介する。これまで、実体強度扱った報告は殆どなく、ユーザー及びメーカーの双方にとって有益なデータとなれば幸いである。本開発は、従来技術と比較すると図1に示す技術レベルになる。

2. サイト説

サイト説は、以下の仮説が基本概念となっている。

1. 鑄鉄における全ての黒鉛形態は、その黒鉛が生成・成長するサイトの形態に律速される。
2. 黒鉛が本来有する基本的な生成・成長挙動は、外的因子によって変化するものではない。

サイト説によると、三角や四角の空洞を存在させることが出来たなら、三角及び四角状黒鉛がつくれることとなる。サイト説を模式的に表したものを、図2に示す。

サイト説は、山本、張、李、川野らの一連の気泡説^{4,5)}

表2 サイト説の実証及び現場技術への応用

サイト説	実証	応用
Mgの黒鉛球状化への関与 ・直接ではない ・気泡として間接的に寄与	・溶湯内へのMg気泡の存在 ⁶⁾ ・Mg気泡への黒鉛晶出 ⁶⁾ ・球状黒鉛へのMg/ハローの存在 ^{1) 7) -9)} ・フリーMg量と黒鉛球状化率の相関 ^{10) 11)} ・発光分光分析によるフリーMgの分析 ^{10) 11)}	・フリーMg量による工程管理 ^{10) 11)} ・ドロス (Mg酸化物等の不純物) 対策 ¹²⁾
フェーディング現象 ・Mg気泡の浮上・消滅 ・Si濃度斑の均一化	・Mg気泡直径の算出 ⁶⁾ ・Si-map分析 ^{1) 7) -9)}	・温度と時間制御 ^{1) 13) 14)} (溶湯処理～鑄込み～凝固開始) ・後期接種 ^{15) 16)}
液・固相の黒鉛生成・成長 ・共通の機構で整理可能	・黒鉛晶出機構と結晶構造 ^{17) -22)} (球状・CV・チャンキ黒鉛)	・チャンキフリー球状化剤の開発 ^{23) 35)} ・凝固時間制御 ^{1) 13) 14) 24) 25)} ・黒鉛ドロス対策 ^{1) 24)}
凝固に伴う収縮・膨張体積収支 ・実用化学成分範囲でプラス	・凝固膨張体積及び圧力 ^{12) 26)} ・製品形状と引巣発生特性 ^{12) 27)}	・熱バランサ、無押湯方案 ^{1) 13)} ・鑄型条件の設定 ²⁶⁾ (鑄型強度、鑄錠形状、締付け)
400°C脆化割れの回避 ・セル間フリーMgをPで相殺	・Mg/P比と高温引張特性 ²⁸⁾	・高・低温脆化対策成分 ^{28) 37)}
機械的性質の肉厚感受性 凝固時間短縮で解消可能	・ミクロ組織・機械的性質改善への凝固時間短縮効果 ^{24) 25)}	・実体強度の保証 ²⁹⁾
チル化現象 ^{5) 30)} ・フリーNが大きく関与	・フリーN固定によるチル防止 ^{32) -34)}	・アーク炉による元湯の溶製 ^{13) 34)}

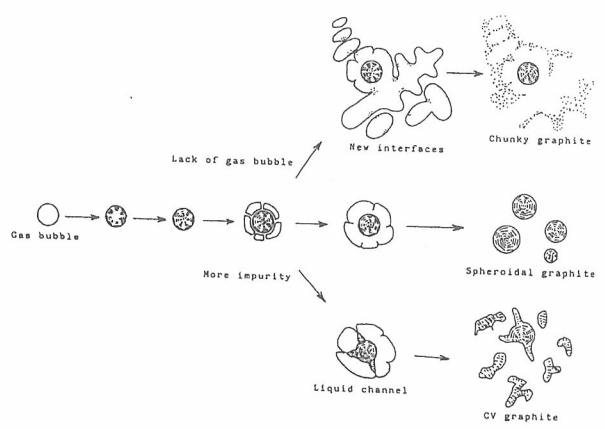


図2 球状化処理溶湯における黒鉛生成・成長の模式図

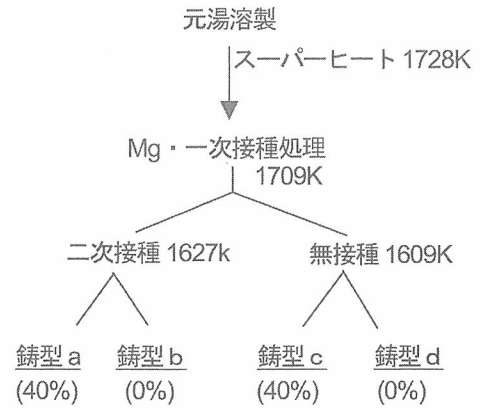


図3 二次接種及び凝固時間制御の実施有無効果の対比要領。百分率%は、供試材重量に対する冷し金率。

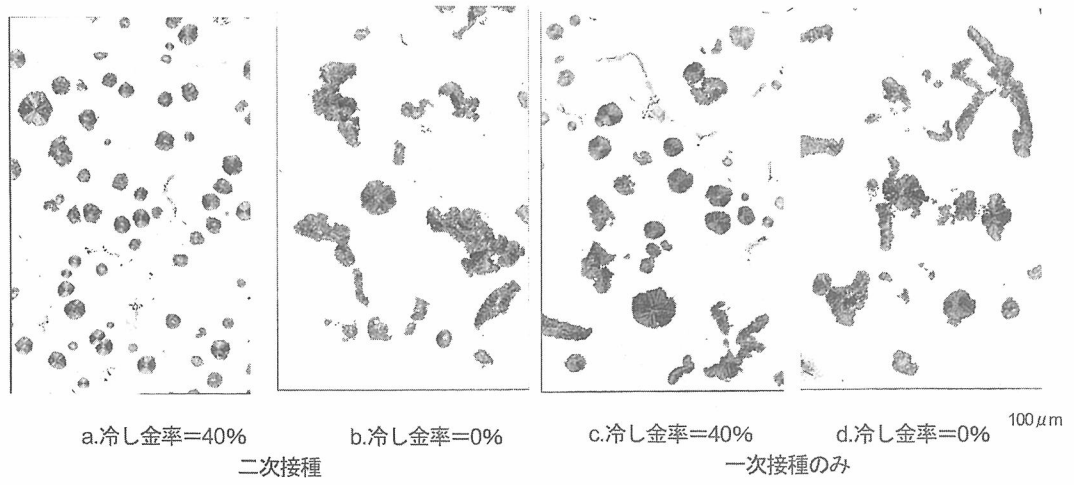


図4 600×600×600 mm 供試材中心のミクロ組織 (5%ナイトール腐食)

を發展させた説であり、一貫性に加え、多くの実証事例に支えられている。サイト説を研究室レベルで実証し、現場に適用した技術には、表2に示すようなものがある。現場

の諸現象を理論的に認識・理解することで、品質制御が可能となる。

表3 厚肉供試材の化学成分 (mass%)

サンプル	C	Si	Mn	P	S	T・Mg	F・Mg
元湯	3.47	1.47	0.16	0.053	0.011	—	—
取鍋	3.43	2.41	0.17	0.053	0.006	0.054	0.048
掛けせき1 (二次接種有)	3.48	2.49	0.17	0.054	0.006	0.050	0.045
掛けせき2 (二次接種無)	3.51	2.40	0.17	0.057	0.006	0.049	0.043

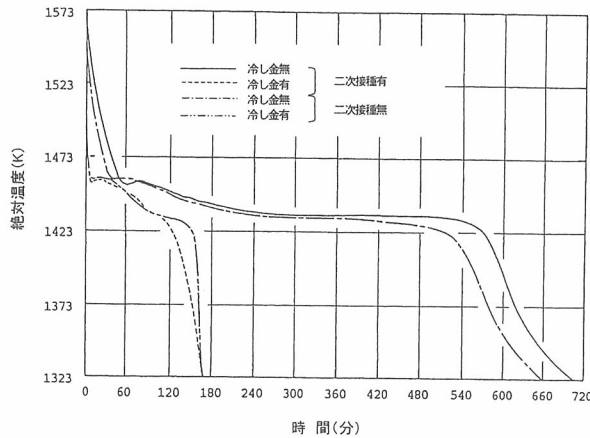


図5 600×600×600mm 供試材中心の凝固冷却カーブ

表4 FCDのひけ巣欠陥対策とそのポイント

項目	設計指標
鑄造方案 無押湯 モジュラスM 安全指数I ⁴⁾ 修正温度勾配 揚がり 熱バランサ 冷し金 凝固時間 湯口比	$M = V/S \geq 2.5 \text{ cm}$ $I = M/F \geq 0.5, F = (L+W)/T$ $G/\sqrt{R} > 0.7, (G/\sqrt{R} < 0.7 \text{ の領域}) \leq 2\%$ G: 温度勾配 (°C/cm), R: 冷却速度 (°C/min) D=0.6M, 又はφ30~60mm D=H=4.8M, L=片側6~8D 厚み=製品肉厚の1.0~1.5倍 <200分 (1:2:4) むくり上げ
造 型 鑄型強度 上下型の締付けおもし 側面の張止め ガス発生源の減少 ガス抜き	4.0~6.0MPa (40~60kgf/cm ²) (浮力+共晶膨張圧) 以上/浮力の3倍 丸棒、ビット込め 水性塗型、lg.Loss<2.0% ガス穴、通気度
溶 解 化学成分 スーパーヒート	C, Si, CE=4.2~4.3% 不純物元素の低減 1773K(1500°C)以上の過熱
鑄込み 処理~鑄込み時間 温度 上昇速度	<15分 1593±20K (1320±20°C) 20~30mm/sec.
凝固・冷却 時間の把握 張り気止め治具の取去り	実測、又は凝固シミュレーション 凝固終了後

3. 保証要領

3.1 ミクロ組織の制御

二次接種だけでは殆ど効果がない。掛けせきでの二次接種と凝固時間制御とを共に実施することにより、肉厚内における球状黒鉛の形態差を小さく出来る。FCD400を用いた600×600×600mm 供試材における基礎実験要領を図3、及びそのミクロ試験結果を図4に示す。同じMg処理溶湯を、二つの掛けせきを介して各々冷し金有無の鑄型に鑄込み、二次接種の効果を見た。一方を掛けせき1とし、二次接種を実施した。他方は掛けせき2とし、二次接種は実施しなかった。ミクロ組織制御においては、凝固開始前のMg気泡の粗大化及びSi濃度斑の均一化阻止をイメージすることがポイントとなる。供試材の化学成分及び熱分析結果を表3

及び図5に示す。

チルはもちろんのこと、黒鉛ドロソやチャンキー黒鉛を発生させることなく粒径が小さく高球状化率が得られる成分設計としてある。また、共晶セル間への異常黒鉛生成が問題となるので、As, Bi, Pb等の不純物元素混入にも注意しなければならない。

チャンキ黒鉛対策として、Sbが微量添加されることがある。実際に効果があることが多い。しかし、実体と共に標準供試材の強度を要求される場合、Sb添加は、好ましくない。実体に比べ、供試材のパーライト率が極端に高くなり、両者の間に強度差が大きくなる³⁵⁾。

黒鉛組織の制御は、非破壊検査精度の点からも重要である。超音波探傷検査では、実体が高球状化率であることが、検査精度確保の基本となる。

3.2 マクロ欠陥の制御

まず、亜共晶~共晶成分ながら、理論的にひけ巣が発生しない成分とすることが重要である。表4の鑄造方案項を満足するなら、実用化学成分範囲において、理論上、ひけ巣が発生することはない。

押湯及び冷し金方案は、類似実績に基づき、凝固シミュレーションにより決定することが望ましい。事例が多いほど、その精度が高くなる。目的の品質を計画通りに得るには、製造工程において表4に示す全項を把握・制御しなければならない。

基本は、無押湯方案である。しかし、形状・寸法によっては、欠陥判定基準をクリアできないために、押湯を必要とすることがある。その際、本技術では、著者によって考案された熱バランサ(表4)を適用している。熱バランサは、従来の押湯のように、自身が引けることはない。

ミクロ組織が良好であっても、欠陥の発生程度と存在箇所によっては、実体強度を著しく低下させる。顧客(設計者)との入念な打合せにより、重要部の許容傷サイズを把握した鑄造方案でなければならない。欠陥と傷とを区別する判定基準を、顧客との間で明確に契約しておかなければならない。

傷 : 使用上許容される判定基準内の傷

欠陥 : 使用上許容されない判定基準外の傷

冷し金の使用によりひけ巣がなくなることは少ないが、発生箇所の移動は可能である。

ひけ巣の大半は、鑄込み中の鑄型ガスの巻き込みによるガスびけであることが多い。押湯方案上のひけ巣と合わせて回避されなければならない。このガスびけは、凝固に伴うひけ巣と区別することが重要である。凝固解析的的中率が低いとする技術者が比較的多いが、このガスびけをひけ巣として扱い、合わせようとしているところに無理がある。

600×600×600mm 供試材は、表4の無押湯方案条件を全て満足した。従って実際の製造においても、揚がり数本の無押湯方案とした。切断面を観察したが、チャンキ黒鉛及び引巣は皆無であった。

3.3 機械的性質の実証

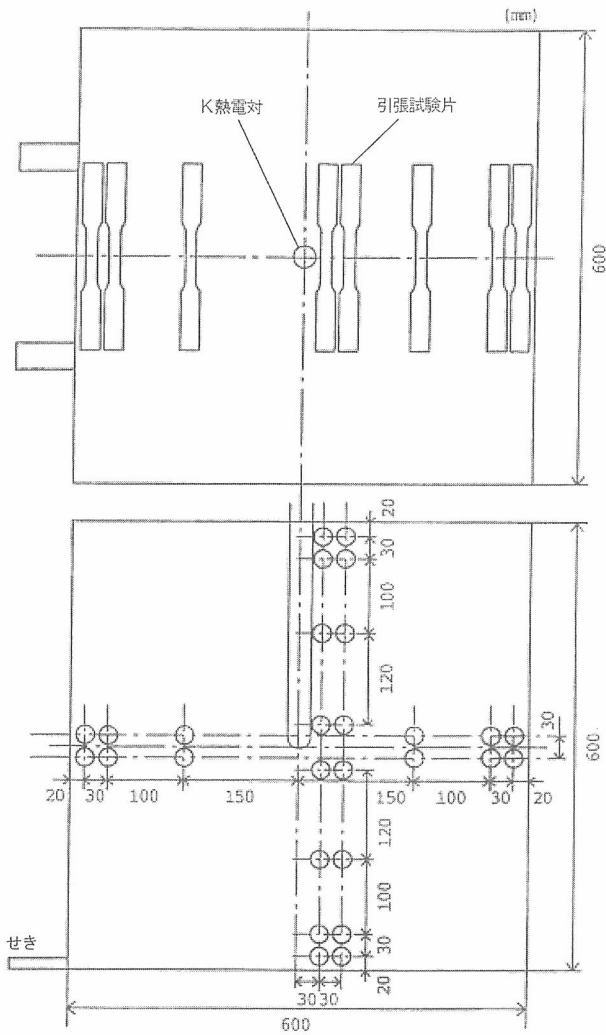


図6 600×600×600mm 供試材からの引張試験片採取位置

600×600×600mm 供試材から図6に示す要領で試験片を採取し、引張試験を実施した。その結果を図7に示す。

マイクロ組織が物語るように、2次接種と凝固時間制御とを併用した場合が最も良く、供試材内の試験箇所間のバラツキも小さい。凝固冷却制御をしない場合、同制御を実施した場合に比べ0.2%耐力の差は殆どないものの、その他の特性は全て大幅に劣る。

実務では、表5に示すような3種類の方法で実体強度の保証がなされている。表中の余長部とは、実体と同じ肉厚の供試材を実体付けした部分である。また、コア材とは、中空ドリルにて実体から採取した供試材である。経済性、信頼性及び工期の観点から、保証要領が選択される。

表5 大型厚肉フェライト系FCDの実体強度保証要領、経済性及び信頼性

供試材	評価			評価後の使用	コスト	信頼性	工期
	強度	欠陥	箇所				
実体	直接	直接	任意	不可	破格に高い	最も高い	2.0 ~3.0倍
余長部	間接 (解析)	間接 (NDT)	取付部	可	安い	高い	≒1.2倍
コア材	直接	直接	加工代内	可	高い	高い	≒1.5倍

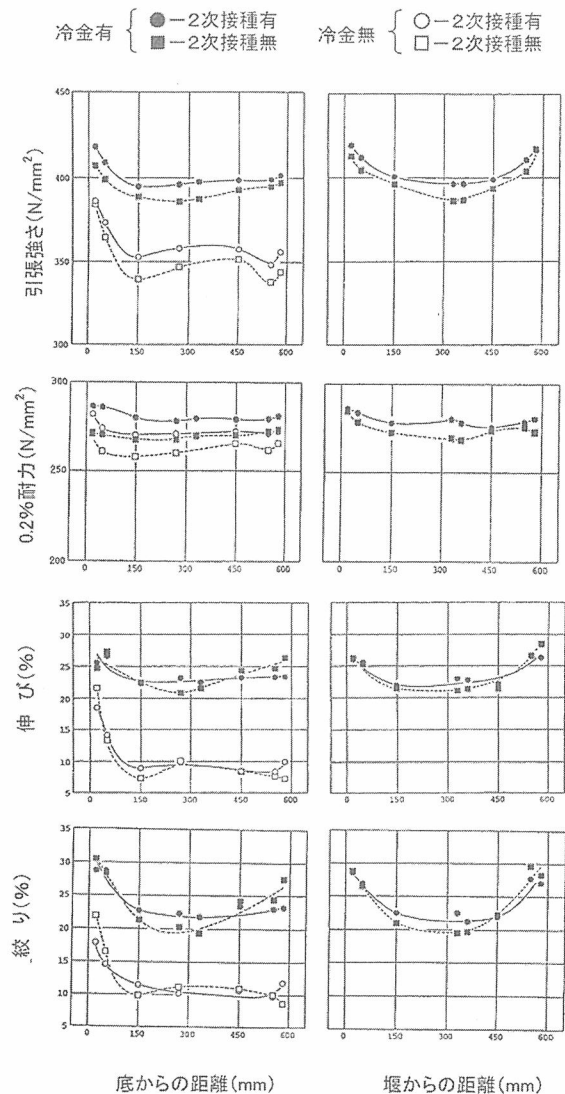


図7 600×600×600mm 供試材の引張特性

3.4 非破壊検査

FCDのひげ巣は、ザク巣状に体積をもって発生する。鑄鋼のように小さく単独的に発生することは、まずない。このため、実体内部の非破壊検査は、超音波探傷検査で充分であり、高価なX線透過試験までは必要ない。ドロス(Mg酸化物等の不純物)等の表面欠陥は、通常、蛍光磁粉探傷検査によって行われる。表面切欠きは、FCDにとって最大のアキレス腱となる。傷の有害性評価は、極めて重要である。

マイクロ組織及び強度等が既知の供試材超音波特性を把握し、それを基準に実体強度を保証することが可能である。具体的には、欠陥エコーの検出がないことを最低条件とし、超音波伝播速度及び多重Bエコーの回数等で判断する。

最近では、渦流電流による強度評価に高い精度があることが分かっている³⁶⁾。超音波評価と併用すると良い。

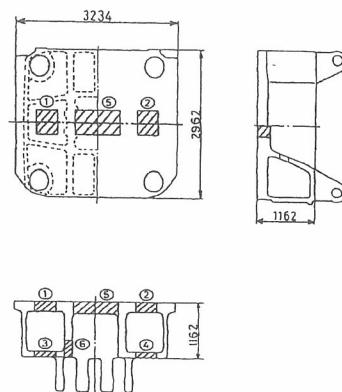
凝固解析による欠陥及び凝固時間制御条件を導き出し、非破壊検査によって高精度な品質判定を行うことは、低コストにて品質を保証出来る方法であり、製造期間の短縮及

事例1-1 実体切断による直接評価：射出成形機のプラテン¹³(FCD450)

表1-1-1 実体の機械的性質(3点平均)

供試材	引張特性				硬度 HB 10/3000	衝撃特性 CVN ₂₀ J	疲労強度 RBS N/mm ²	破壊靱性 ΔK _{th} MPa√m	ヤング率 E N/mm ²
	σ _{0.2} N/mm ²	σ _B N/mm ²	ε %	φ %					
仕様規格	≥210	≥350	≥15	≥15	≥126	—	≥150	—	≥157000
②	上層	250	381	26	23	146	15	180	—
	中層	252	388	21	19	141	9	—	—
	下層	255	378	21	19	142	10	—	—
④	上層	257	382	18	18	141	9	—	—
	中層	256	387	18	15	141	8	—	—
	下層	258	391	24	23	145	14	167	—
⑤	ドロス層*	246	325	5	10	142	14	—	—
	上層	257	390	25	24	142	13	184	8.96
	中層	259	390	18	16	141	9	—	166110
	下層	263	382	19	19	141	10	—	168660
⑥	上層	253	383	21	17	142	11	—	—
	中層	250	386	23	21	144	11	—	—
	下層	252	385	20	19	138	11	—	—

*加工代内



最大肉厚 : 245mm
 概略寸法 : 3234×2967×1162mm
 鑄放し重量 : 37600kg
 歩留り : 96%
 冷し金重量率 : 35%

図1-1-1 実体の概要及び供試材採取位置

事例1-2 実体切断による直接評価：大型橋梁用伸縮継手部品³⁷(FCD400)

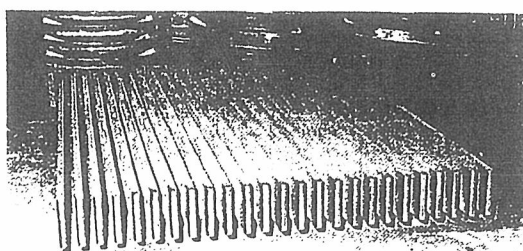
表1-2-1 実体化学組成(mass%)

C	Si	Mn	P	S	Mg
3.52	2.16	0.01	0.008	0.007	0.052

表1-2-2 別鑄込み供試材及び実体の機械的性質

供試材	引張特性				硬度 HBS 10/3000	衝撃特性		疲労特性	
	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)		CVN _{RT} (J)	CVN _{-20°C} (J)	RBS _{RT} (N/mm ²)	RBS _{-20°C} (N/mm ²)
規格	≥250	≥400	≥18	—	120-180	≥18*1	≥12*2	—	—
JIS G 5502 C Type (t=50mm)	273	417	24	23	151	20	17	—	—
	270	408	29	30	146	19	16	—	—
規格	≥250	≥390	≥18	—	120-180	≥18*1	≥12*2	≥190	≥190
実体橋部 (t=35mm)	262	389	24	22	129	20	12	206	194
	265	398	26	30	134	20	12	—	—
	256	388	26	29	135	20	14	—	—
規格	≥240	≥370	≥18	—	120-180	≥18*1	≥12*2	—	—
実体固定部 (t=185mm)	248	380	26	27	131	21	13	—	—
	247	370	24	22	131	21	12	—	—
	248	373	25	23	129	21	12	—	—

*1 Min.16J *2 Min.10J



最大肉厚 : 185mm
 概略寸法 : W2280×L3330×H280mm
 鑄放し重量 : 6900kg
 歩留り : 79%
 冷し金重量率 : 0%

図1-2-1 実体の概要

びコストの低減にもつながる。既に一部の製品での実施実績があり、現在、横展開中である。

3.5 使用条件への配慮

寒冷地、或いは400℃付近での仕様等、特殊使用への配慮も必要となる。

寒冷地、或いは低温環境で使用される場合には、その環境温度における衝撃吸収エネルギー（J）の保証が重要である。黒鉛粒径は、小さいほど良い。一方、低温域での引張・疲労強度評価は、あまり意味をなさない。特に疲労強度は、低温雰囲気を設定しても、試験材の温度は、疲労応力を受けて上昇する。

400℃付近で使用される場合には、脆化割れ対策が必要

である。原因は、黒鉛球状化に寄与しなかった余剰のフリーMg^{10,11}が、共晶セル間に存在しており、400℃付近で応力を受けることによりMgC₂へと変化するためと推定されている。このフリーMgは、Pによって固定することで、悪影響を阻止できる²⁸⁾。

いずれにしても、肉厚交差部や加工部のコーナーRは、応力集中が起こらないような大きさとする必要がある。顧客との入念な事前打合せが重要となる。

4. 事例

添付資料に実体強度保証事例を示す。

4.1 実体切断による直接評価

事例2-1 余長部による間接評価：射出成形機のプラテン(FCD450)

表2-1-2 化学成分(mass%)

C	Si	Mn	P	S	T・Mg	F・Mg
3.49	2.36	0.26	0.029	0.006	0.043	0.036

表2-1-2 本体付け供試材及び実体の機械的性質

供試材	試験片 No.	引張特性				HB 硬度 10/3000	
		$\sigma_{0.2}$ N/mm ²	σ_B N/mm ²	ϵ %	ϕ %		
—	JIS規格	≥280	≥450	≥10	—	140~210	
c号Yブロック	①	290	483	20	16	155	
	②	295	484	19	14	159	
	③	281	452	19	24	145	
	④	280	454	20	25	142	
—	仕様規格	≥210	≥350	≥15	—	120~130	
余長部	ドross層 (加工代内)	1-1	192	358	8	10	125
		1-2	250	349	6	7	129
		1-3	252	349	6	7	129
	上層	2-1	257	395	30	29	123
		2-2	259	397	28	28	127
		2-3	257	399	28	25	129
	中層	3-1	255	380	22	20	124
		3-2	255	383	24	21	124
		3-3	259	386	24	21	125
	下層	4-1	261	392	26	24	124
		4-2	264	392	26	25	125
		4-3	263	391	28	26	125

(株) 宇部スチール

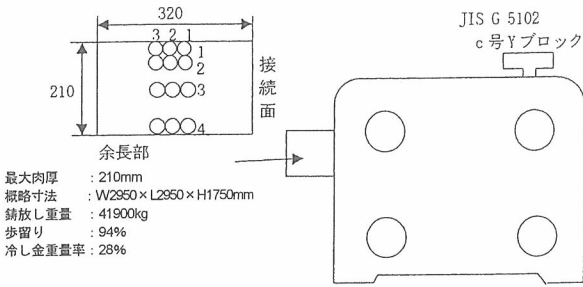


図2-1-1 実体の概要及び供試材採取位置

事例2-2 余長部による間接評価：金型(FCD450)

表2-2-1 化学成分(mass%)

C	Si	Mn	P	S	T・Mg	F・Mg
3.34	2.43	0.29	0.035	0.002	0.046	0.042

表2-2-2 余長部供試材及び実体の機械的性質

供試材	試験片 No.	引張特性				HB 硬度 10/3000	
		$\sigma_{0.2}$ N/mm ²	σ_B N/mm ²	ϵ %	ϕ %		
—	仕様規格	—	≥275	≥5	—	—	
余長部 ①	内径側	内-1	299	442	23	23	—
		内-2	299	438	19	16	—
		内-3	302	443	20	15	—
	中心	中-1	307	454	15	15	—
		中-2	307	452	16	12	—
		中-3	302	442	17	14	—
	外径側	外-1	304	443	21	20	—
		外-2	299	442	24	23	—
		外-3	296	442	26	23	—

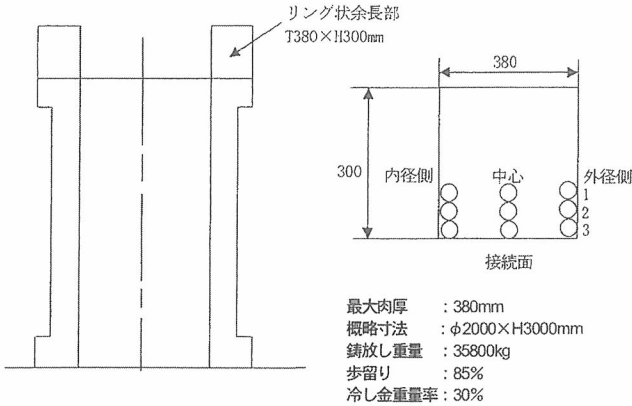


図2-2-1 実体の概要及び供試材採取位置

事例3-1 コア材による直接評価：フェライト系ステータ押え板(FCD450)

表3-1-1 化学成分(mass%)

C	Si	Mn	P	S	T・Mg	F・Mg
3.38	2.43	0.26	0.045	0.017	0.048	—

表3-1-2 実体付供試材及び実体の機械的性質

供試材	試験片 No.	引張特性				HB 硬度 10/3000
		$\sigma_{0.2}$ N/mm ²	σ_B N/mm ²	ϵ %	ϕ %	
—	JIS規格	≥250	≥400	≥15	—	130~180
本体付	1 ¹⁾	302	450	32	30	149
	2 ¹⁾	311	453	28	28	150
	3 ¹⁾	302	447	25	28	152
本体コア	2 1 ²⁾	293	462	22	12	158
	2 2 ²⁾	293	445	22	16	154
	2 3 ²⁾	294	450	18	15	154
	2 4 ²⁾	301	463	23	16	156

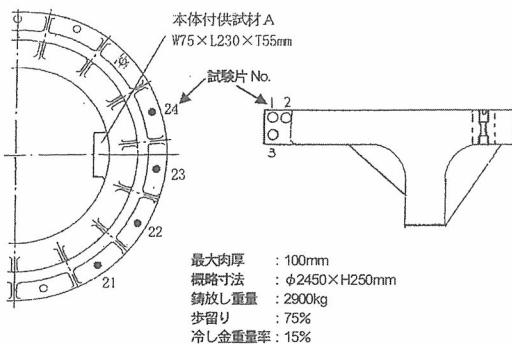
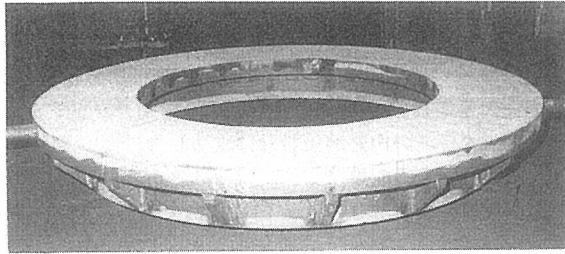


図3-1-1 実体の概要及び供試材採取位置

注記1) $\phi 14 \times GL50mm$
2) $\phi 14 \times GL30mm$

事例3-2 コア材による直接評価：オーステナイト系ステータ押え板 (FCDA-NiMn13 7)



主要肉厚：130mm 鑄放し重量：7000kg
歩留り：74% 冷し金重量率：26%

図3-2-1 実体の概要

表3-2-1 実体付供試材及び実体の機械・物理的性質 (2点平均)

供試材	引張特性			硬度	比透磁率	吸収エネルギー	
	$\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)	ϵ (%)	HB (10/3000)	μ (8 KA/m)	CVN ₂₀ (J)	
JIS G 5510-1999	≥210	≥390	≥15	130-170	≈1.02	>16	
実体付 C号YB	鑄放し	244	358	6	165	1.20-1.60	17
	γ処理	278	568	38	164	1.01-1.02	36
コア*	鑄放し	215	315	14	132	1.02-1.05	-
	γ処理	259	484	23	162	1.01-1.02	-

*押湯下及び押湯間コア供試材

- ①射出成形機のプラテン^{13,14)}.....事例1-1
- ②大型橋梁用伸縮継手³⁷⁾.....事例1-2
- 4.2 余長部による間接評価
 - ①射出成形機のプラテン.....事例2-1
 - ②金型...事例2-2
- 4.3 コア材による直接評価
 - ①フェライト系ステータ押え板.....事例3-1
 - ②オーステナイト系ステータ押え板³⁸⁾.....事例3-2

5. まとめ

凝固冷却挙動を深く理解し、目的に応じて制御することにより、実体強度の保証は可能となる。

参考文献

- 1) H. Itofuji, Doctorate Degree Thesis, Kyoto University (1993).
- 2) H. Itofuji, AFS Trans. **104** (1996), 79.
- 3) 糸藤, こしき, **26** (2003) 10.
- 4) 張博, 明智清明, 塙健三, アグネ (1983).
- 5) 李鏞河, 京都大学学位論文 (1986).
- 6) H. Itofuji, Int. J. Cast Metals Research, **17**, (2004) 220.
- 7) H. Itofuji, CAST METALS, (1992) 6.
- 8) H. Itofuji, Int. J. Cast Metals Research, **14** (2001), 15.
- 9) H. Itofuji, H. Yamada, IMONO, **67** (1995) 767.
- 10) H. Itofuji, Int. J. Cast Metals Research, **12** (1999) 179.
- 11) H. Itofuji, J. JFS, **72** (2000) 645.
- 12) K. Nakayama, H. Itofuji, H. Sagawa, Report of JFS, **128** (1996) 105.
- 13) H. Itofuji, K. Kawamura, N. Hashimoto, H. Yamada, AFS Trans. (1990), 585.
- 14) H. Itofuji, Keith D. Millis World Symposium on Ductile Iron, Hilton Head Is., SC, Oct. **19-23** (1993).
- 15) A. Masutani, Y. Tsurui, H. Itofuji, N. Hashimoto, H. Yamada, Report of JFS Meeting **123** (1993) 105.
- 16) A. Masutani, Y. Tsurui, H. Itofuji, M. Murakami, H. Yamada, Report of JFS Chugoku & Sikoku Meeting (1993) 21.
- 17) H. Itofuji, et al, AFS Trans. **91** (1983) 831
- 18) H. Itofuji, Y. Kawano, N. Inoyama, S. Yamamoto, B. Chang, T. Nishi, AFS Trans. **91** (1983) 313.
- 19) H. Itofuji, Y. Kawano, N. Inoyama, S. Yamamoto, B. Chang, T. Nishi, IMONO, **56** (1984) 11.
- 20) H. Itofuji, H. Uchikawa, AFS Trans. **98** (1990) 429.
- 21) H. Itofuji and A. Masutani, Int. J. Cast Metals Research, **14** (2001) 1.
- 22) H. Itofuji, A. Masutani, J. JFS, **76** (2004) 1.
- 23) H. Itofuji, A. Masutani, Patent No. 3475607 (2003).
- 24) H. Itofuji, M. Tamura, T. Nakanishi, Report of JFS Meeting **134** (1999), 54.
- 25) H. Itofuji, M. Tamura, Report of JFS, **135** (1999) 74.
- 26) H. Itofuji, M. Tamura, A. Masutani, T. Nakanishi, Report of JFS, **131** (1997) 53.
- 27) 糸藤春喜, 日本強靱鑄鉄協会平成8年度技術講習会 (1997).
- 28) 糸藤春喜, 榎谷歩, 学振・鑄鉄分科会, 研究報告書 (2000) 283.
- 29) 田村幹夫, 李保柱, 榎谷歩, J. JFS, **75** (2003) 712.
- 30) 井ノ山直哉, 山本悟, 川野豊『反応論からみた鑄鉄』新日本鑄鍛造協会 (1992) .
- 31) H. Itofuji, S. Okamura, H. Yamada, Report of JFS Meeting, **118** (1991) 63.
- 32) H. Sagawa, H. Itofuji, N. Hashimoto, Report of JFS Meeting, **119** (1991) 18.
- 33) H. Sagawa, H. Itofuji, Report of JFS Meeting, **120** (1992) 38.
- 34) H. Sagawa, H. Itofuji, M. Tanaka, N. Hashimoto, Report of JFS Meeting, **118** (1991) 62.
- 35) H. Itofuji, A. Nakayasu, Report of JFS Meeting, **144** (2004) 141.
- 36) T. Abe, T. Uchimoto, T. Takagi, S. Tada, J. JFS, **76** (2004) 878.
- 37) Ube Steel Co., Ltd., SOKEIZAI, **39** (1998) 5.
- 38) Ube Steel Co., Ltd., Toshiba Co., Ltd., SOKEIZAI, **43** (2002) P3.