

平成7年度技術賞・豊田賞受賞記念
講演会及び見学会 日程表

H7,6,16

改4

[I] 講演会 日時：平成7年7月20日(木) 10:00~17:00

会場：広島弥生会館 2F 芙蓉

「広島市東区二葉の里 3-2-15 : Tel 082-263-8411」

「司会：(社)日本鋳物協会 常務理事 生井 亨」

10:05~10:10 挨拶 " 中国・四国支部長 塩田 俊雄

(注) 講演時間のなかには約5分の質疑応答の時間を含みます。

10:10~10:50 豊田賞講演：「多品種少量生産鋳造工場における生産管理システム」
日鋼マテリアル(株) 石田 俊一

10:50~11:30 豊田賞講演：「縦型遠心鋳造法によるカリバー鋳出しロールの製造技術」
虹技(株) 菅田 宏

" 〇熊岡 政雄

ケーシーエンジニアリング(株) 平根 光義

11:30~12:10 技術賞講演：「遠心鋳造法による長尺素材の生産技術の向上」
テーピ工業(株) 木村 秀皓

---- 昼食休憩 ----

13:15~13:55 技術賞講演：「大物厚肉ダクタイル鋳鉄の製造技術」
(株)宇部スチール 〇糸 藤 春 喜

" 山田 肇

13:55~14:35 豊田賞講演：「鋳鉄生型鋳物のばりなし生産技術の向上」
日立金属(株)九州工場 〇五 家 政 人

" " 日比野 満

" 真岡工場 石原 安興

" 桑名工場 土井 基邦

14:35~15:15 技術賞講演：「自動車用鋳鉄部品の金型鋳造システムの開発」
ホンダエンジニアリング(株) 川口 正敏

" 〇田島 宣夫

" 山口 二三夫

---- 休憩 ----

15:25~16:05 技術賞講演：「クローズドデッキアルミブロックの吸引金型鋳造法の開発」
トヨタ自動車(株) 林 芳郎

" 甲斐田 健治

" 〇升田 隆一

16:05~16:45 技術賞講演：「溶湯吸引式真空ダイカスト法による
過共晶Al-Si合金製品の実用化」

住軽テクノス(株) 犬丸 晋

住友軽金属工業(株) 〇宇野 照生

住軽テクノス(株) 片岡 義典

16:45~16:55 閉会の挨拶と事務局よりのご案内

平成7年7月20日(木)

大物厚肉ダクタイル鋳鉄の製造技術

(株) 宇部スチール
工博 糸藤 春喜
山田 肇

1. 緒言

従来、大物厚肉の球状黒鉛鋳鉄(DC I)における製造条件は、化学成分、球状化処理、接種、鑄型及び鑄造方案等に関し、十分に制御されているとは言えなかった。例えば、球状黒鉛鋳鉄と鑄鋼の凝固様式が全く異なるにも拘らず、球状黒鉛鋳鉄の鑄造方案(主に押湯)には、鑄鋼のそれが採用されていた。その結果、以下に示すようなミクロ及びマクロ欠陥が、大物厚肉DC Iに発生していた。

- (1) チャンキィ黒鉛
- (2) ミクロ及びマクロ引巢
- (3) 黒鉛粒の粗悪、粗大化(低粒数化)
- (4) 黒鉛及びMgドロソ
- (5) 逆チル
- (6) ふくれ及び外引け

従来の品質管理レベルでは、現在の様に高品質が要求される大物厚肉DC I^{1)~3)}を製造することは、不可能である。

上述の欠陥の中で最も厄介で、しかも従来の黒鉛球状化理論では理解し難いのが、チャンキィ黒鉛の晶出である。このチャンキィ黒鉛が機械的性質に悪影響を及ぼすことが認識されて以来、多くの晶出防止対策⁴⁾が取られてきた。しかし、それらの多くは、特定の場合に効果があるものの、少し条件が異なる他の場合には効果がないことが多かった。

引巢は、2番目に厄介な欠陥である。引巢対策として、ある研究者⁵⁾は押湯方案を推奨し、またある研究者ら^{6) 7)}は無押湯及び押湯方案の両方を推奨している。実際に両方案共に効果のある鑄物があるもの、全ての鑄物にはあてはまらない。

これら2大鑄造欠陥は、独自の球状化理論(サイト説^{8) 9)})を展開して整理すると、比較的容易に防止出来る事が分かった。以下に、その例を紹介する。このサイト説は、山本、張、川野⁶⁾らの気泡説を発展させたものである。

2. サイト説の適用

サイト説は、黒鉛の球状化・退化、及びそれ以外の種々の黒鉛の生成・成長メカニズムを説明出来る仮説である。サイト説の基本概念は、以下のとおり。

- (1) 鑄物中に形成される全ての黒鉛形態は、液・固相を問わず、その黒鉛が生成・成長するサイト(場所)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、外的因子により変化しない。大物厚肉DCI製造へのサイト説の適用とは、Mg処理した溶湯の凝固様式及び球状黒鉛生成・成長メカニズムをイメージしながら、製造条件を設定し工程を管理することを意味している。

無欠陥で尚かつ実体強度を保証するための製造条件の制御として、サイト説では、次に示す要素を重要視している。

- (1) 溶湯処理から凝固開始までの時間、及び凝固時間の短縮
- (2) 鑄型系内の均一凝固
- (3) 共晶膨張体積及び圧力の有効利用

これらを具体的な管理項目及び値で示すと、次のようになる。

(1) 化学成分 (wt%)			
C	3.40~3.50	Ce	<0.010
Si	2.10~2.40	Mg	0.040~0.050
Mn	<0.35	O	<0.0020
P	<0.050	N	<0.0090
S	0.006~0.015	その他の不純物	<0.20
Ca	<0.0050	炭素当量	4.20~4.30

- (2) 球状化处理から鑄込みまでの時間 (分) <15
- (3) 鑄込み温度 (°C) 1315±10
- (4) 凝固時間T (分) 20<T<180
- (5) モジュラスM (=V/S, cm) >2.5

V=体積 (cm³)

S=表面積 (cm²)

- (6) 無押湯方案安全指数⁶⁾ I (=M/F) >0.5

M=モジュラス

F=形状係数

$$= (L+W) / T$$

L=長さ (cm)

W=巾 (cm)

T=肉厚 (cm)

- (7) 修正温度勾配¹⁰⁾ K (=G/R) >1.0

K<1.0の領域 (%) <2.0

G=温度勾配 (°C/cm)

R=冷却速度 (°C/分)

- (8) 鑄型強度(Kgf/cm²) >40~60¹¹⁾ (共晶膨張圧)

- (9) 締付け (Kgf/mm²) >浮力+共晶膨張圧

以上の管理値を全て満足させると、無押湯方案にて無欠陥で実体強度が保証出来る大物厚肉DCIの製造が可能である。項目(6)、(7)の管理値を満足しない場合、押湯のようなパッドを用いることで、上述と同様な品質の大物厚肉DCIを得るこ

とが出来る。このパッドは、従来の押湯的感覚で用いるのではなく、実体に熱的バランスを与える目的で使用する。この理由により、このパッドを熱ランサーと名付けた。実体同様、この熱ランサーには引巣の発生がない。しかし取去ると、実体に引巣が発生する。これらは、「大物厚肉DCIが理想的に凝固すると、体積変化はプラスとなる。」という基本概念^{6) 8)}に立脚している。

3. 適用例

図1に示す大物厚肉DCIに対し、サイト説に基づいて製造条件を設定した。設計上重要な斜線部は、無欠陥でしかも実体強度が保証出来るように、特に重点的に解析した。前章項目(4)及び(7)は、コンピューターによりシミュレートした。シミュレーションにより得られた無押湯鑄造方案を図2に示す。

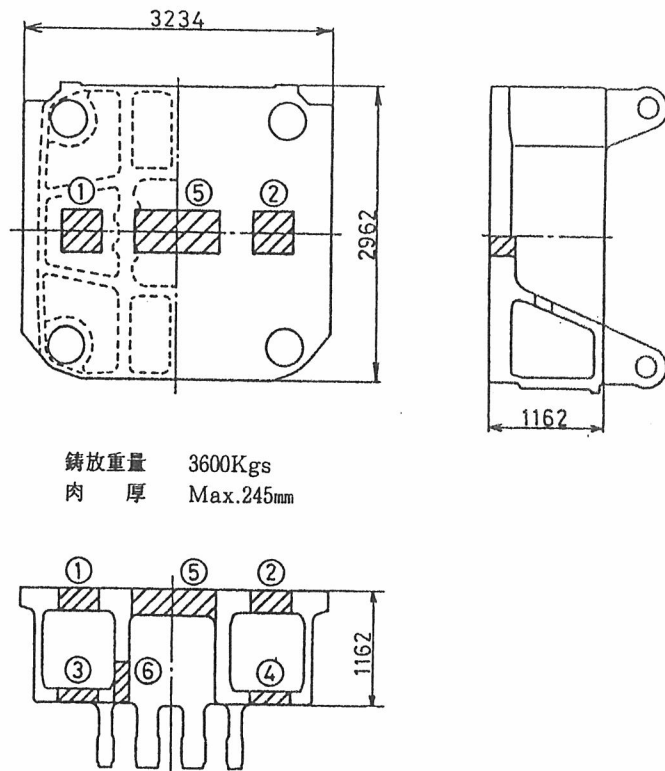
比較のため、上述と酷似の大物厚肉DCIに対して、従来説を適用して製造した。その鑄造方案を図3に示す。押湯は、式(1)によりその大きさを決定した。

$$D = H = K_1 \cdot K_2 \cdot M \dots\dots(1)$$

D = 押湯の直径 (cm)
 H = 押湯の高さ (cm)
 K₁ = 係数 = 6

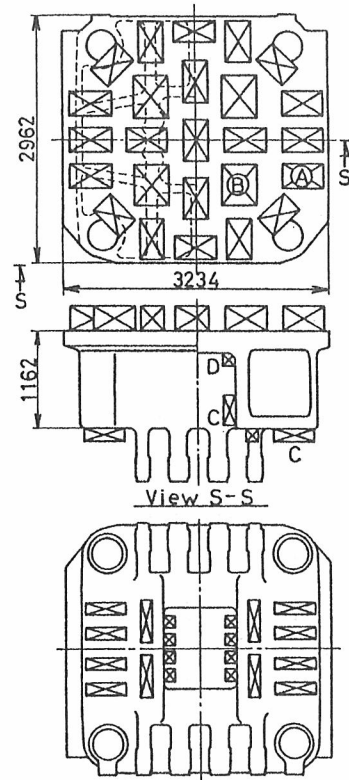
K₂ = 保温スリーブの係数 = 0.8
 M = モジュラス (cm)

両大物厚肉DCI共に、鑄造方案以外は、殆ど同じ製造条件とした。鑄型は、フラン型で、鑄込み前に乾燥機にて約130℃で12時間乾燥した。上下型間は、φ75mmの棒鋼8本で締付け、鑄型の側面は、ピット壁を利用して固定した。元湯は、塩基性ライニングのアーケ炉で溶製し、鑄型の近くに移動して球状化及び接種処理を行った。溶解材料及び溶湯処理条件を表1、2に示す。処理した溶湯は、掛堰を介して鑄型に鑄込んだ。鑄込み条件は、溶湯処理条件と共に表2に示す。コンピューター・シミュレーションの精度を確認するため、実体のDCIの凝固冷却カーブを実測した。また浮力、静圧及び共晶膨張圧に対する鑄型の締付け・固定効果を



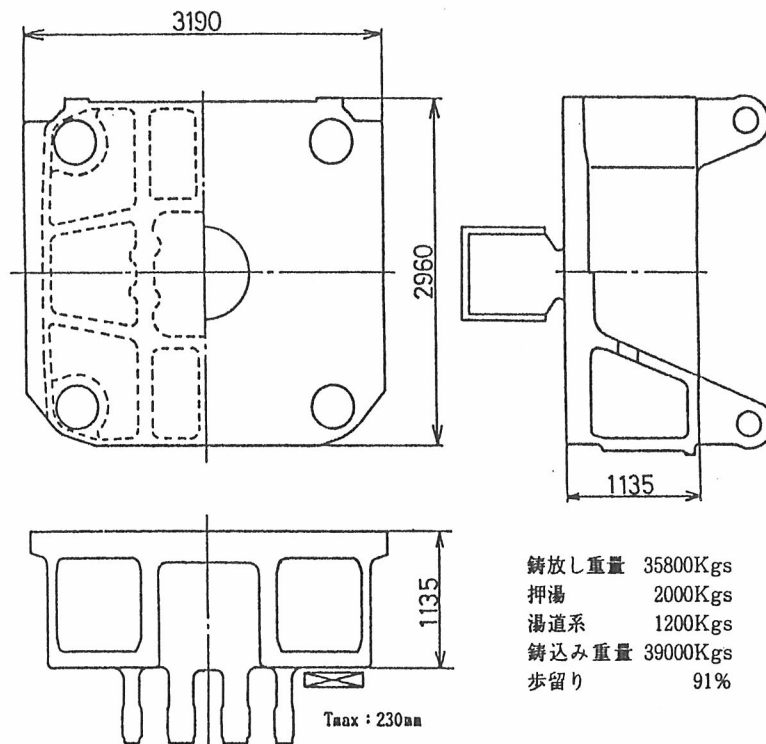
鑄放重量 3600Kgs
 肉厚 Max.245mm

図1 サイト説を適用した大物厚肉DCI。斜線部は、機械設計上の重要部。



鑄放し重量	36000Kgs
湯道系	1200Kgs
揚り	400Kgs
鑄込み重量	37600Kgs
歩留	95.7%
冷金	13000Kgs

図2 サイト説を適用した大物厚肉DCIの冷金・無押湯方案



鑄放し重量	35800Kgs
押湯	2000Kgs
湯道系	1200Kgs
鑄込み重量	39000Kgs
歩留り	91%

図3 従來說を適用した類似DCIの押湯方案

確認するため、土木用のトランジット及びスケール等を用いて、鑄型壁の移動を測定した。鑄放しは、約 550℃で行った。その後、引続き 560℃×8 Hrの歪取り焼鈍を実施した。

健全性の評価は、目視及び超音波探傷試験により、図 1 の斜線部を中心に詳細に行った。この斜線部については、表 3 に示す要領で機械的性質の評価も行った。目標とした機械的性質を表 4 に示す。但し、衝撃値については、特に要求がなされなかった。機械試験用の試験片素材を採取し、加工する際、切断及び加工面を観察することによって、超音波探傷試験による健全性評価結果の精度を確認した。

大物厚肉 DCI に鑄込んだ溶湯と同チャージの溶湯を、別に造型した標準試験ブロック (JIS G 5502B 及び C タイプ) の鑄型に鑄込んだ。各々のブロックより試験片を採取し、引張及び硬度試験を行った。そして、その結果を大物厚肉 DCI の値と比較した。

4. 結果及び考察

(1) 化学成分

両大物厚肉 DCI の掛堰における化学成分を表 5 に示す。主要、不純物及びガス元素は、各々発光分光分析装置、ICP 及び自動ガス分析装置により分

表 1 溶解材料の化学成分

原材料	化 学 成 分 (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ca	Al	Bl	
鉄 鉄	4.17	0.26	0.03	0.027	0.015	微量	微量	Fe	
鋼 屑	0.01	1.11	0.19	0.011	0.008	微量	微量	Fe	
Fe-Si	0.05	75.7	微量	0.015	0.005	0.34	1.27	Fe	
SiC	60.6	26.4	—	—	0.070	—	0.2	灰分	
カーボン	99.0	—	—	—	0.020	—	—	灰分	
黒 鉛	60.0	—	—	—	微量	—	—	灰分	

表 2 溶湯処理及び鑄込み条件

ヒート	処理剤 (添加量, wt%)	化 学 成 分 (wt%)							処理温度 ℃	反応時間 分	フェー ン/時 分	鑄込み	
		Si	Ba	RE	Ca	Mg	Al	Bl				温度 ℃	時間 秒
サイ ト 説 適 用 DCI	球状化剤 (1.2)	45.90	—	0.39	2.04	5.86	0.33	Fe	1400	Ladle 1 : 2.5	13	1322	76
	接種剤 (0.3)	73.53	1.40	—	2.45	—	1.72	Fe		Ladle 2 : 2.5	17	1324	
従 来 説 適 用 DCI	球状化剤 (1.2)	45.04	—	1.90	1.81	5.85	0.38	Fe	1420	Ladle 1 : 3.5	18	1350	90
	接種剤 (0.3)	73.53	1.40	—	2.45	—	1.72	Fe		Ladle 2 : 3.5	23	1290	

表3 大物厚肉DCIの実体機械的性質の評価方法

試験	試験片	条件	試験肉厚
引張特性	JIS Z 2201; No.4	歪速度; 3.3×10^{-4} 1/sec.	(2) (4) (5) (6)
衝撃値	JIS Z 2202; No.4	衝撃エネルギー; 3 kgf·m 室温	(2) (4) (5) (6)
ブリネル硬度	引張試験片のホルダー	10mm/3000kg	(2) (4) (5) (6)
回転曲げ疲労	JIS Z 2274; No.1-12	回転速度; 3000rpm 最大モーメント; 1.5kg·m	(1) (3) (5)
弾塑性破壊靱性 J _{IC}	ASTM E 813; 1インチB CT 647-78T (W=2B)	除荷コンプライアンス法	(5)
疲労亀裂伝播速度 △K _{th}	ASTM E 647; 1インチB CT -78T (W=5B)	直接法	(5)

表4 大物厚肉DCIに要求されている機械的性質^{1) - 3)}

引張特性				ブリネル 硬度	衝撃値	破壊靱性	
0.2%耐力	抗張力	伸び	絞り			K _{IC}	J _{IC}
kgf/mm ²	kgf/mm ²	%	%	10/3000	kgf·m/cm ²	kgf/mm ^{3/2}	kgf/mm
≒21.2	35.8-36.8	15.0-20.9	15.1-25.3	126-130	2.8-2.9	230-330	3.2-4.4

表5 掛堰における両大物厚肉DCIの化学成分

ヒート	化 学 成 分 (wt%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ca	Ce	Mg	CE	OI	O	N
サイト説適用 DCI	3.46	2.36	0.28	0.045	0.007	0.0024	0.004	0.043	4.25	0.16	2.5	28.0
従來說適用 DCI	3.40	2.15	0.35	0.043	0.007	0.0026	0.017	0.044	4.12	0.17	3.5	60.5

$$CE = TC + 1 / 3 Si$$

$$OI = \text{他の不純物の総和}$$

$$= Cr + Ti + Sn + Al + As + Pb + Sb + Bi + Zn + V + Nb$$

析した。 サイト説適用の大物厚肉DCIは、ほぼ目標どおりとなっている。一方従來說適用の大物厚肉DCIは、Ceが高く、CEが低めとなっている。

(2) 凝固時間

サイト説を適用した大物厚肉DCIの実測及びシミュレーションによる凝固冷却カーブを、図4に示す。両者の間に良いマッチングが見られ、シミュレーション精度が高いことを示している。従來說を適用した大物厚肉DCIについても同様なシミュレーションを行うと、凝固時間が約12Hrとなる。サイト説適用により前者は、約80%の凝固時間を短縮したことになる。

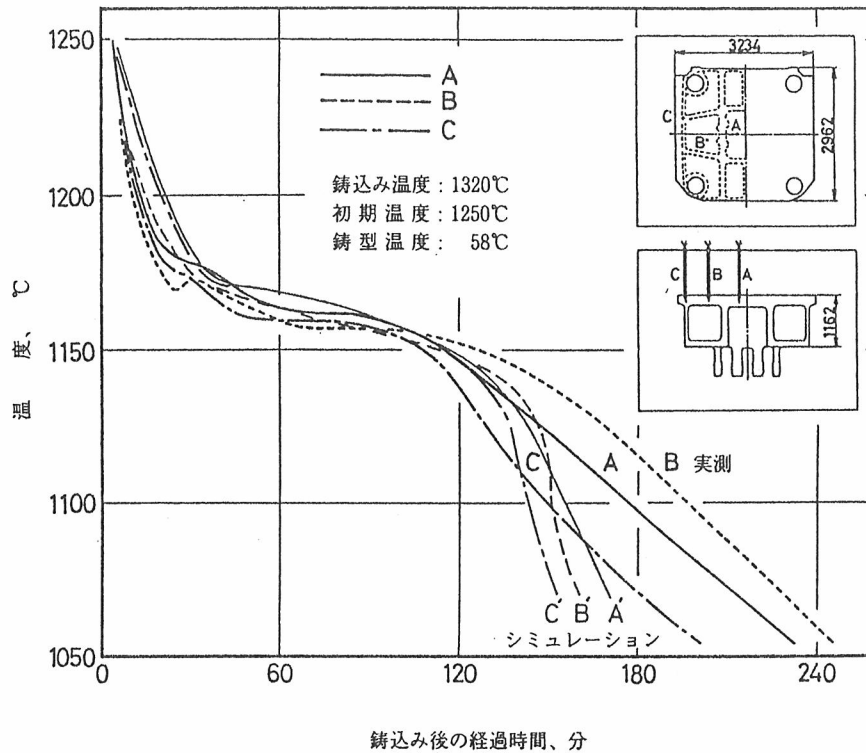


図4 サイト説を適用した大物厚肉DCIの凝固冷却カーブ

(3) 鑄型壁の移動

両大物厚肉DCIの鑄型壁移動測定結果を図5に示す。鑄込み直後の上下型間の鑄型壁移動に関し、両者の間に顕著な差が見られた。サイト説適用の大物厚肉DCIの方が他方に比べ、上型方向への移動量が極端に少ない。これは、冷金により厚く発達した凝固殻が、溶湯の浮力及び凝固膨張圧力を鑄物内部に封込めたためと思われる。この効果は、「冷金による蓋効果」と名付け、ふくれ防止及び凝固膨張圧力の有効利用に役立てている。

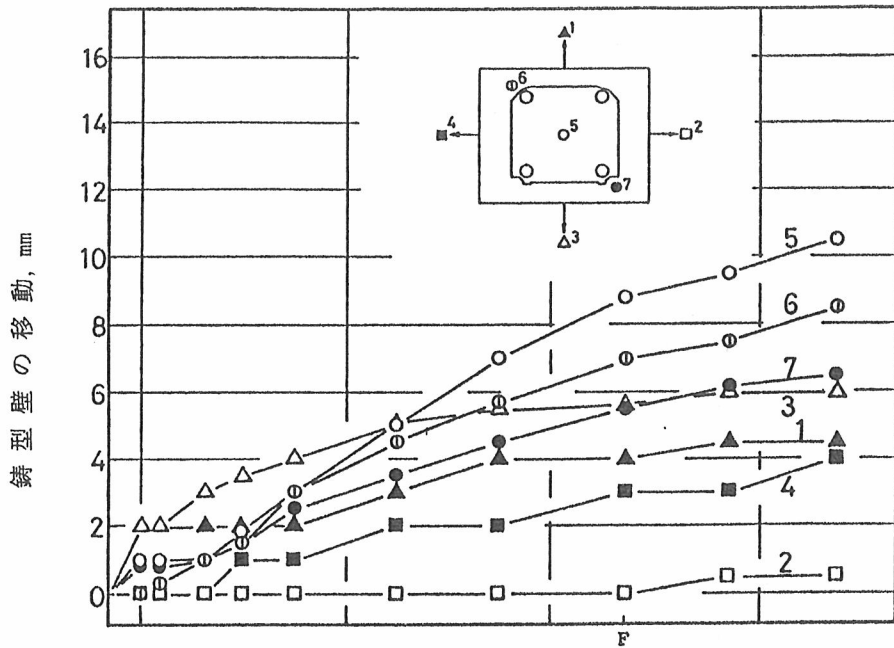
下型側面の鑄型壁の移動量は、両者の間に大差はないが、両者共に固定の最も弱い側面に、静圧及び膨張圧が集中的に働く傾向にあった。

(4) 健全性

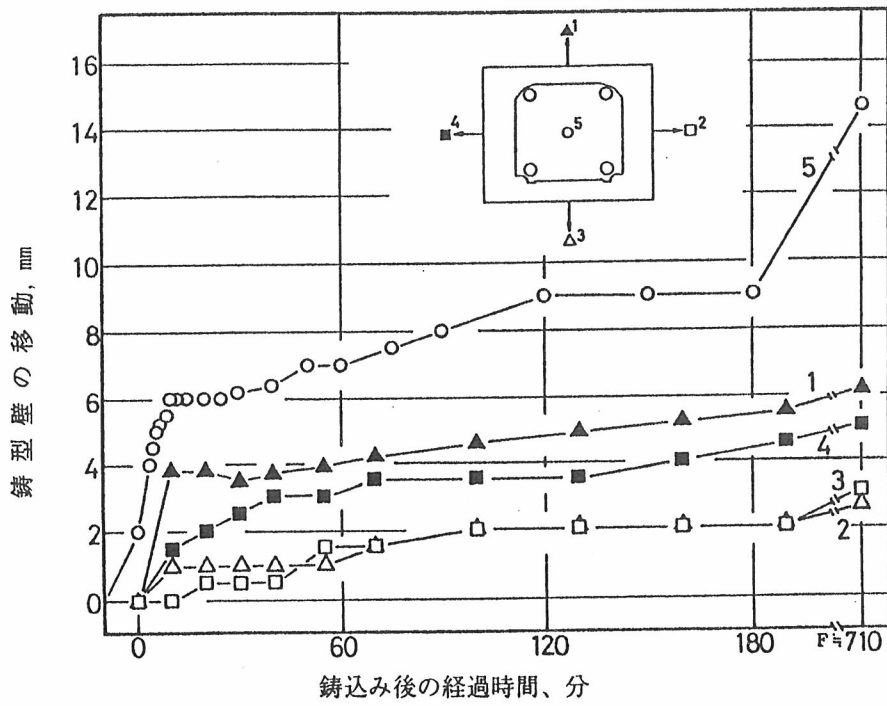
目視による外観と超音波探傷試験による内部の健全性を評価した結果、サイト説適用の大物厚肉DCIは、内外共に問題となるような欠陥は皆無であった。欠陥ゼロは、後に肉厚切断面及び試験片表面の観察によっても確認出来た。他方の大物厚肉DCIは、盲押湯のネック周辺にふくれ(8mm)が観察された。しかし、その他のマクロ欠陥は、内外共に観察されなかった。

(5) ミクロ組織

超音波伝播速度を測定することにより、両大物厚肉DCIの各主要肉厚部の球状化率を評価することを試みた。その結果、全測定箇所の値は、両者共に5610~5640m/sec.を示し、球状化率としては、80%以上となることが予測され



(a)



(b)

図5 鑄型壁の移動=(a)サイト説適用のDC I、(b)従來說適用のDC I。測定点1-4=下型の側面、測定点5-7=上下鑄型間、F=最大肉厚部の凝固終了時間。

た。しかし、後に球状化率を直接測定した結果、この方法は、厚肉部の球状化率判定には適用出来ないことが分かった。サイト説を適用した大物厚肉DCIは、全ての肉厚部において95%以上のフェライト基地と90%以上の球状化率を示し、予測どおりであった。代表的なマイクロ組織を図6に示す。しかしながら、他方の大物厚肉DCIは、全ての主要肉厚部に多量のチャンキィ黒鉛、共晶炭化物及びネット状パーライトが観察された。このマイクロ組織を図7に示す。

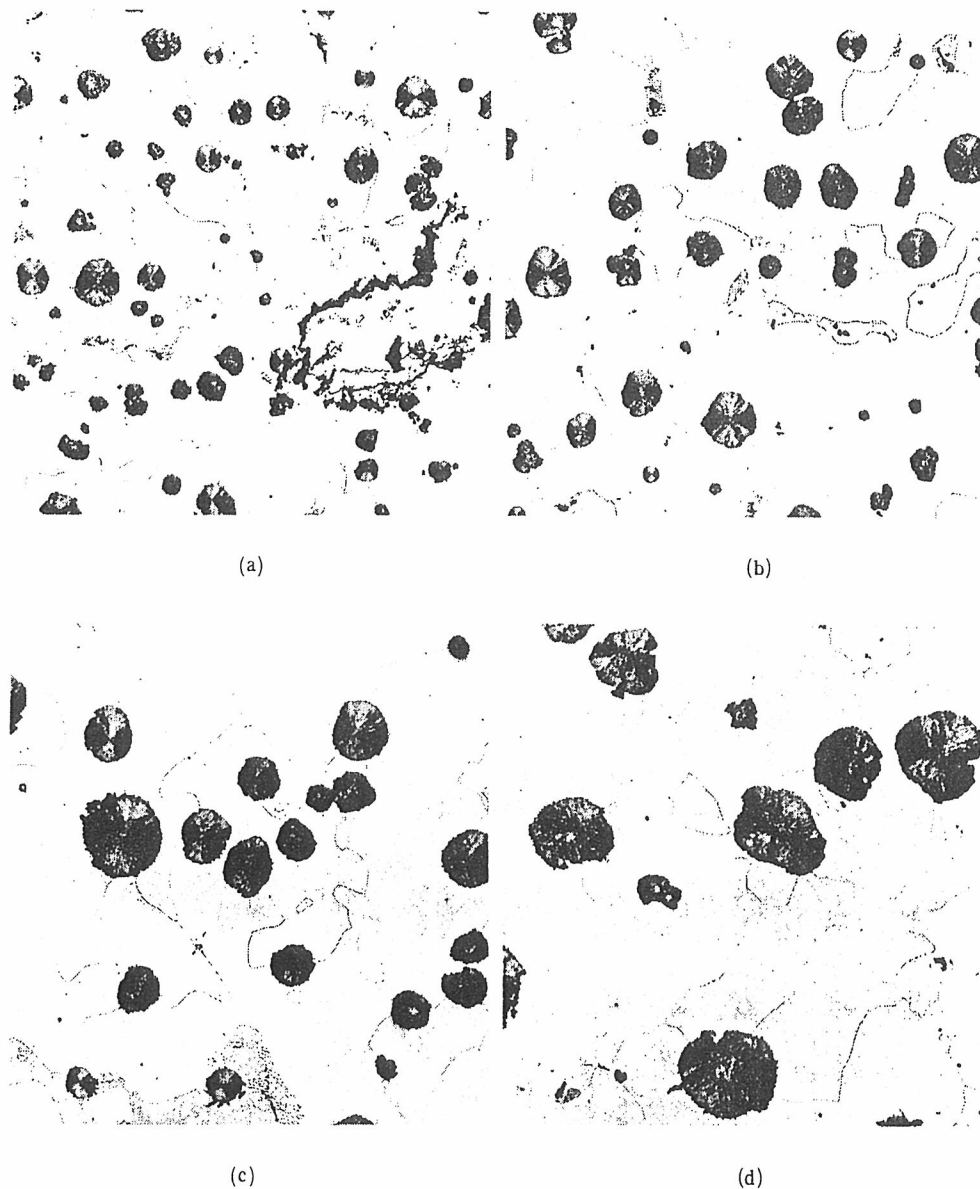


図6 サイト説適用の大物厚肉DCIの最大肉厚部におけるマイクロ組織＝(a)仕上げ代内のMgドロソ層(冷金側)、(b)上層、(c)中層、(d)下層(砂型側)。2%ナイトール腐食。

厚肉部における球状及びチャンキィ黒鉛組織は、ボトム・エコーの感度によって識別することが出来た。肉厚が同じ場合、球状黒鉛組織は、チャンキィ黒鉛組織より低感度で100%ボトム・エコーを得ることが出来る。例えば感度が64dBの場合、前者が100%のボトム・エコーだったとすると、後者は約45%と言う具合である。

(6) 機械的性質

両大物厚肉DCIの重要肉厚部における全機械的試験の結果を表6及び7に示す。

(6) - 1 引張特性

サイト説を適用した大物厚肉DCIの重要肉厚部の平均引張特性は、表4の目標値を上回り、全て申し分のない値を示した。しかも個々の値は、大部分の試験層においてほぼ均一であった。最大厚肉部の仕上げ代内にMgドロソが発生した。参考のため引張試験を行ったところ、0.2%耐力は、他の健全層と同様に良い値を示したものの、抗張力、伸び及び絞りは、他を下回る値を示した。

一方従來說を適用した大物厚肉DCIの場合、全ての重要肉厚部において、しかも殆ど全ての試験層にチャンキィ黒鉛が晶出していた。これらチャン

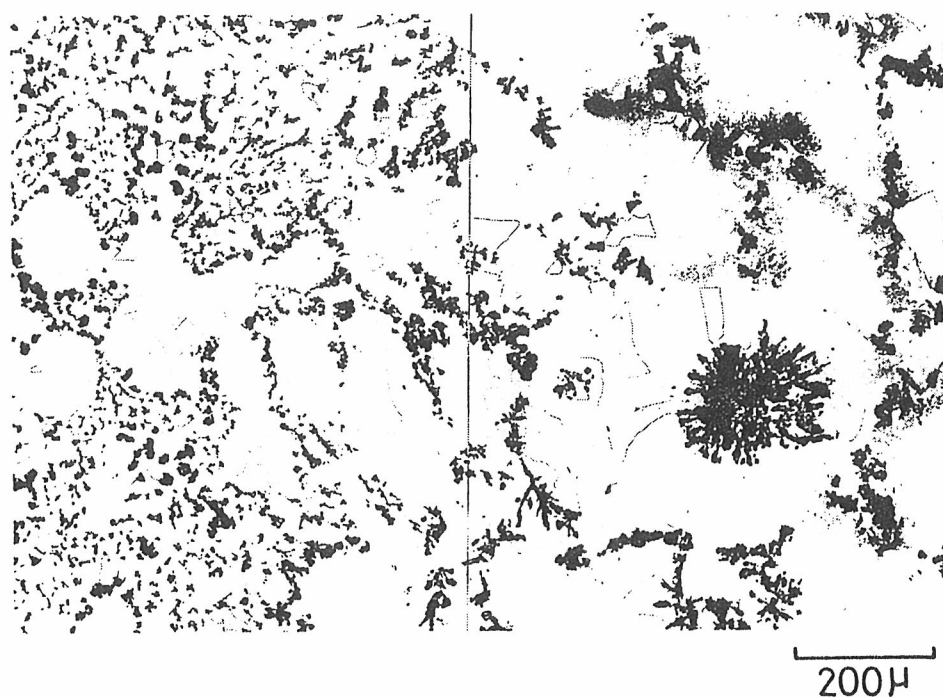
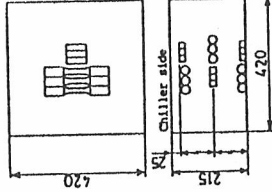
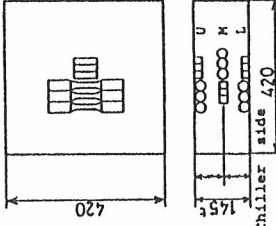
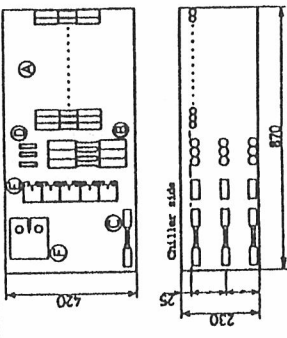
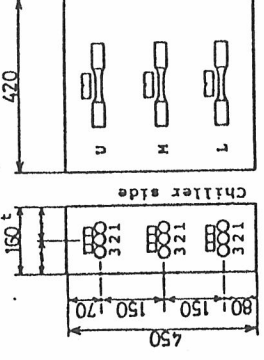


図7 従來說適用大物厚肉DCIの最大肉厚部に晶出したチャンキィ黒鉛層のマイクロ組織。2%ナイタール腐食。

表 6 サイト説適用大型DCIの機械的性質

試験箇所	PSO.2	TS	EL	RA	HB	CVN	RBS(ER)	J1c(KIc)	E	ΔKth		
(2)	U	25.6	38.9	27.3	23.6	144	18.4(0.47)					
		25.3	38.3	24.6	21.3	146						
		25.5	39.3	24.6	23.2	147						
	M	25.7	39.5	20.3	18.1	143	1.0					
		25.9	39.6	21.0	19.1	140	0.9					
		25.6	39.5	21.6	19.4	140	0.8					
	L	25.9	38.7	21.0	16.9	137	1.0					
		26.0	38.0	21.4	18.8	143	1.1					
		26.1	38.8	21.7	20.7	146	1.0					
	(4)	U	26.3	38.9	16.4	15.4	147	1.0				
			26.0	39.2	22.4	20.6	138	0.9				
			26.2	38.7	14.8	17.4	137	1.0				
M		26.2	39.7	20.6	17.2	140	0.9					
		26.1	39.6	18.4	15.9	141	0.9					
		26.0	39.2	16.0	12.1	143	0.8					
L		26.1	39.9	25.6	24.1	147	1.4	17.0(0.47)				
		26.4	39.9	21.2	22.3	146	1.5					
		26.3	39.9	24.6	23.2	143	1.4					
(5)		Dr	24.7	32.8	6.0	8.4	137	1.5				
			25.3	33.1	6.0	11.1	146	1.4				
			25.3	33.5	4.2	9.8	143	1.5				
	U	26.0	39.6	24.8	24.1	143	1.3	18.8(0.43)	5.9(333)	17140	28.9	
		26.3	40.0	25.0	24.1	143	1.3					
		26.3	39.6	24.0	22.8	140	1.3					
	M	26.3	39.6	16.0	13.8	140	0.9					
		26.3	39.6	17.0	16.4	140	0.9					
		26.6	40.0	19.6	17.7	143	1.0					
	L	26.6	39.3	21.4	20.3	140	1.1					
		27.0	39.0	19.0	19.0	143	1.0					
		27.0	38.7	16.6	16.4	140	1.0					
(6)	U	25.6	39.1	23.6	18.8	140	1.4					
		25.8	39.2	23.0	17.9	146	1.1					
		26.1	38.9	16.8	14.7	140	1.0					
	M	25.9	39.5	29.2	25.7	142	1.1					
		25.2	39.4	22.8	19.3	147	1.3					
		25.3	39.1	18.0	16.8	143	0.9					
	L	25.7	39.3	25.6	23.5	135	1.1					
		25.6	39.2	16.2	17.3	140	1.1					
		25.9	39.2	19.6	17.6	139	1.1					

表 7 従来説適用大型 D C I の機械的性質

試験箇所	PSO.2	TS	EI	RA	HB	CVN	RBS(ER)	J1c(K1c)	E	ΔKth	
 <p>(2)</p>	U	27.9 27.1 27.5	32.2 29.6 31.2	4.4 2.6 2.9	2.8 1.4 1.8	131 129 128	0.8 0.8 -	16.0(0.52)			
	M	27.1 25.5 26.6	29.6 28.9 29.1	4.2 3.2 4.0	4.0 2.6 3.9	0.7 0.7 0.9					
	L	26.1 25.8 26.1	39.2 36.9 37.9	7.8 7.8 7.8	8.5 5.8 7.0	137 126 137	1.0 0.9 1.0				
	U	25.5 25.1 25.3	38.8 38.7 38.9	16.9 14.0 14.1	15.3 9.6 9.9	19.2(0.51)	1.0 1.1 0.9				
	M	26.2 26.2 26.2	36.3 35.3 36.1	5.6 4.2 5.5	4.5 3.3 3.3	0.6 0.6 0.6					
	L	24.5 24.4 24.5	38.1 37.7 37.9	23.0 21.4 21.9	20.6 16.6 18.3	121 121 115	1.3 1.6 1.3				
 <p>(4)</p>	U	26.2 26.6 26.0	32.0 34.7 36.1	6.4 8.7 9.0	4.2 4.4 6.9	149 144 137	1.0 1.1 1.0	15.7(0.46)			
	M	25.5 25.4 25.0	28.5 28.0 28.9	3.6 2.8 3.4	1.6 1.6 2.1	149 146 146	0.8 1.0 1.1		3.1(238) 3.5(253) 2.3(205)	17000 15990 17020	48.0
	L	22.6 25.8 22.7	28.5 28.7 25.3	5.0 5.9 4.2	2.1 2.0 1.7	145 137 132	0.7 0.9 0.9				
	U	1 2 3	26.1 25.4 25.3	32.8 30.9 32.0	5.8 3.4 4.3	5.3 3.7 5.4	1.0 1.2 1.0				
	M	1 2 3	25.9 25.0 25.9	32.5 31.5 32.0	6.0 3.8 4.0	3.8 1.7 3.2	0.9 0.8 1.2				
	L	1 2 3	25.6 24.7 25.3	32.5 31.0 32.5	5.8 4.2 4.4	4.4 1.7 3.8	0.6 0.8 0.7				
 <p>(5)</p>	U	26.1 25.4 25.3	32.8 30.9 32.0	5.8 3.4 4.3	5.3 3.7 5.4	1.0 1.2 1.0					
	M	1 2 3	25.9 25.0 25.9	32.5 31.5 32.0	6.0 3.8 4.0	3.8 1.7 3.2	0.9 0.8 1.2				
	L	1 2 3	25.6 24.7 25.3	32.5 31.0 32.5	5.8 4.2 4.4	4.4 1.7 3.8	0.6 0.8 0.7				
	U	1 2 3	26.1 25.4 25.3	32.8 30.9 32.0	5.8 3.4 4.3	5.3 3.7 5.4	1.0 1.2 1.0				
	M	1 2 3	25.9 25.0 25.9	32.5 31.5 32.0	6.0 3.8 4.0	3.8 1.7 3.2	0.9 0.8 1.2				
	L	1 2 3	25.6 24.7 25.3	32.5 31.0 32.5	5.8 4.2 4.4	4.4 1.7 3.8	0.6 0.8 0.7				
 <p>(6)</p>	U	26.1 25.4 25.3	32.8 30.9 32.0	5.8 3.4 4.3	5.3 3.7 5.4	1.0 1.2 1.0					
	M	1 2 3	25.9 25.0 25.9	32.5 31.5 32.0	6.0 3.8 4.0	3.8 1.7 3.2	0.9 0.8 1.2				
	L	1 2 3	25.6 24.7 25.3	32.5 31.0 32.5	5.8 4.2 4.4	4.4 1.7 3.8	0.6 0.8 0.7				
	U	1 2 3	26.1 25.4 25.3	32.8 30.9 32.0	5.8 3.4 4.3	5.3 3.7 5.4	1.0 1.2 1.0				
	M	1 2 3	25.9 25.0 25.9	32.5 31.5 32.0	6.0 3.8 4.0	3.8 1.7 3.2	0.9 0.8 1.2				
	L	1 2 3	25.6 24.7 25.3	32.5 31.0 32.5	5.8 4.2 4.4	4.4 1.7 3.8	0.6 0.8 0.7				

※表6及び7の各機械的性質の記号

PS0.2	: 0.2%耐力 (Kgf/mm ²)
TS	: 抗張力 (Kgf/mm ²)
E1	: 伸び (%)
RA	: 絞り (%)
HB	: ブリネル硬度 (10/3000)
CVN	: シャルピーVノッチ衝撃値 (Kgf·m/cm ²)
RBS	: 回転曲げ疲労限強度 (Kgf/mm ²)
ER	: 耐力比 (RBS/TS)
J _{1c}	: 弾塑性破壊靱性 (Kgf/mm)
K _{1c}	: 応力拡大係数 (Kgf/mm ^{3/2}) { = (E · J _{1c} / 1 - R ²) ^{1/2} }
R	: 係数=0.3
E	: ヤング率 (Kgf/mm ²)
ΔK _{th}	: 応力拡大係数の下限値 (Kgf/mm ^{3/2})
U	: 肉厚の上層
M	: 肉厚の中層
L	: 肉厚の下層
Dr	: 肉厚のMgドロス層

キィ黒鉛晶出層では、0.2%耐力のみ良好な値を示すものの、他の特性は極めて悪い。またチャンキィ黒鉛晶出層は、上述のMgドロス層よりも悪い引張特性を示した。

(6)ー2 ブリネル硬度 (HB)

サイト説を適用した大物厚肉DCIのブリネル硬度は、全ての試験部においてほぼ均一な値を示した。Mgドロスは、図6の程度ではブリネル硬度に影響を及ぼさなかった。従來說を適用した大物厚肉DCIの方は、115-149 HBの範囲でばらついた。これは、チャンキィ黒鉛セルが大きいこと、基地組織が粗いことが原因と思われる。

(6)ー3 シャルピーVノッチ衝撃値 (CVN)

衝撃値は、特に目標値を設定していなかったため、高い値を得るための特別な対策を実施しなかった。しかし、大物厚肉DCIとしては良い値であり、ばらつきも少ない。図6程度のMgドロスは、衝撃値に悪影響を及ぼさなかった。

従來說を適用した大物厚肉DCIのチャンキィ黒鉛晶出部の値は、サイト説を適用した大物厚肉DCIのそれより低い。

(6)ー4 弾塑性破壊靱性 J_{1c}

弾塑性破壊靱性値から応力拡大係数 (K_{1c}) を算出するに際し、ヤング率は、J_{1c}試験を実施した各肉厚層で測定した。

サイト説を適用した大物厚肉DCIの最大肉厚部におけるヤング率は、各試験肉厚層共にヤング率がほぼ同じであり、平均値は17100Kgf/mm²であった。J_{1c}値は、表4に示した目標値を大きく上回った。従って、計算によって求められたK_{1c}も良好であった。凝固制御により得られた黒鉛の高球状化率がJ_{1c}値に好影響を及ぼしているものと思われる。

他方の大物厚肉DCIにおけるチャンキ黒鉛晶出部のJ_{1c}は、球状化率の観点からも予測出来るように、当然のことながら低い値を示した。しかし、ヤング率は以外に高く、平均値が16670Kgf/mm²と高球状化率の黒鉛組織を有する場合より少し低い。一般には球状化率とヤング率、更にはヤング率と超音波伝播速度の間には、良い相関があると言われている¹²⁾¹³⁾。しかし、チャンキ黒鉛組織の場合には、上記のような一般則は適用出来ない。

(6)－5 回転曲げ疲労限強度 (RBS)

RBSは、鋳物の表面品質によって大きく左右される。このため試験片は、重要肉厚部における仕上げ代除去後の表面層より採取した。鋳物の対称性を考慮して、肉厚①及び③の試験結果は、表6及び7の肉厚②及び④の欄に各々記入した。肉厚①及び③の耐力比ER (=疲労限強度/抗張力)の計算には、肉厚②及び④の引張試験結果の値を各々使用した。

大物厚肉DCIの耐力比は、一般に約0.42¹⁴⁾と言われている。この値を用いて計算すると、サイト説を適用した大物厚肉DCIの肉厚①③及び⑤の回転曲げ疲労限強度は、各々16.3、16.8及び16.7Kgf/mm²となる。しかし、本RBS試験値は、全てこれらを上回った。凝固制御により良好なミクロ組織としたことが、この原因と思われる。各応力における疲労寿命は、肉厚が増す程ばらつきが大きかった。

従來說を適用した大物厚肉DCIの場合、球状化率及び引張特性が良かった肉厚③のみRBS値が高く、サイト説を適用した大物厚肉DCIの同等部より更に高い値を示した。これは、RBS値にとっては黒鉛粒径が大きい方が有利なことを示している。チャンキ黒鉛組織を有する肉厚①及び⑤の場合、他方の鋳物の同等部より少し低い値ではあるが、むしろ予想に反した高い値であった。

(6)－6 疲労亀裂伝播速度

サイト説を適用した大物厚肉DCIの疲労亀裂伝播速度試験は、最大肉厚部⑤の両表面近傍で実施した。文献によると¹⁵⁾、凝固速度が遅く黒鉛粒間距離が大きい程、応力拡大係数の下限値(ΔK_{th})が大きくなるとする報告がある。しかし、この研究では、冷金側がΔK_{th}=28.9Kgf/mm^{3/2} 砂型側が25.4Kgf/mm^{3/2}と反対の傾向を示した。応力拡大係数の上限値

(ΔK_{fc})も砂型側より冷金側の方が高く、各々183.5Kgf/mm^{3/2}、217.8Kgf/mm^{3/2}であった。これらΔK_{fc}値は、J_{1c}値から計算で求めたK_{1c}値より低かった。

他方の大物厚肉DCIは、最大肉厚部⑤のチャンキ黒鉛晶出層で試験し

た。 チャンキィ黒鉛の晶出にも拘らず、 $\Delta K_{th}=49.5\text{Kgf/mm}^{3/2}$ 、 $\Delta K_{fc}=194.7\text{Kgf/mm}^{3/2}$ と良好な値を示した。 しかし、亀裂伝播速度 (da/dN) は、良好な球状黒鉛組織の場合より速い。

(7) 標準試験片の機械的性質

引張及びHB硬度試験結果を表8に示す。 両チャージの別鑄込みYブロック同士の値は、ほぼ同等であった。 しかし、両大物厚肉鑄物の各試験箇所との値とは、大きく異なった。 更に従來說を適用した大物厚肉鑄物では、Yブロックの機械的試験結果からチャンキィ黒鉛の晶出を予測することが不可能であった。

上述のようにチャンキィ黒鉛の晶出を、超音波特性で非破壊的に検知することは難しい。 大物厚肉鑄物の実体強度及びマイクロ組織を詳細に評価するには、現在のところ破壊試験以外にない。 しかし、品質を意図的に制御し、超音波特性との関係を綿密につかめば可能となることが実証された訳である。

5. 結論

大物厚肉DCIの製造に対してサイト説を適用することにより、目標どおりの超高品質を得ることが出来た。 しかし、従來說を適用した場合は、目標に遠く及ばなかった。 現在、実操業において射出成形機だけでなく、大物厚肉のガス・タービン、ディーゼルエンジン、クラッシャー、鍛造機械、押出プレス、ダイカスト・マシン等の部品製造に対してサイト説を適用し、成果をあげつつある。

表8 別鑄込み標準試験片の機械的性質

ヒート	試験素材 (JIS G 5502, Y型)	PSO.2	TS	El	RA	HB
サイト説適用DCI	B号	37.3	65.6	9.4	9.8	247
		38.3	66.9	9.0	7.0	207
	C号	35.1	57.2	9.4	8.4	183
		35.1	61.7	9.2	8.4	192
従來說適用DCI	B号	34.6	57.2	7.1	8.6	201
		39.2	63.1	6.6	6.0	201
	C号	36.5	56.5	11.2	12.4	192
		36.4	59.4	11.2	12.4	207

記号

PS 0.2 : 0.2%耐力 (kgf/mm²) RA : 絞り (%)
 TS : 抗張力 (kgf/mm²) HB : ブリネル硬度 (10/3000)
 El : 伸び (%)

参考文献

- 1) J.M.Motz; Seminar 「Containers for Radioactive Materials Made from Nodular Cast Iron」 Berlin, June 9-10 (1987), P199.
- 2) R.Helms and J.Ziebs; Seminar 「Containers for Radioactive Materials Made from Nodular Cast Iron」 Berlin, June 9-10 (1987), P67.
- 3) QA Committee (Japan); Seminar 「Containers for Radioactive Materials Made from Nodular Cast Iron」 Berlin, June 9-10 (1987), P267.
- 4) 例えば、R.Barton; Foundry Trade J., Vol.155, July 14 (1983), No.3267, P40.
- 5) N.P.Sinha and V.Kondic; 41st International Foundry Congress, Belgique (1974), Paper No.7.
- 6) B.Chang, K.Akechi and K.Hanawa, "Spheroidal Graphite Cast Iron-- Basic, Theory and Application," Agne (Japan), (1983), P203.
- 7) S.I.Karsay; FWP Journal, Oct. (1984), P55.
- 8) H.Itofuji; Thesis for Doctor's Degree at Department of Metal Science and Technology in Kyoto University, (1994).
- 9) H.Itofuji, H.Uchikawa; The 57th World Foundry Congress, Poster Session, Osaka, Japan, Sept.25-26 (1990), A15.
- 1 0) S.Takamori, E.Niyama and K.Ikawa; IMONO, Vol.61, No.12 (1989), P906.
- 1 1) K.S.Lee and M.Kayama; IMONO, Oct.30 (1976), P11./S.I.Karsay; Ductile Cast Iron 3, QIT (Canada), (1981), P67.
- 1 2) A.Orlikowski, W.Pittack and G.Buchholy; Giesserei, Vol.76, Nr.20 (1989), P701.
- 1 3) T.Abe, S.Zhung-Wang and K.Ikawa; IMONO, Vol.57, No.6 (1985), P13.
- 1 4) K.B.Palmer; the British Foundryman, Vol.75, Nov. (1982), P201.
- 1 5) P.Bhandhubanyong, Paper for Doctor's Degree, Tokyo University (1983).