

## 高シリコンFCDへのチャンキイ黒鉛の晶出

(株) 宇部スチール ○田村 幹夫  
中西 貴史  
糸藤 春喜

### 1. 緒言

肉厚が100mmを超えるような厚肉のFCDにおいては、 $Si^{1) 2)}$ 、 $Ce^{3) 7)}$ 、 $Ni^{1) 2) 8)}$ 、 $Ca^{5) 9)}$ 、 $Cu^{2)}$ 、 $Mo^{10)}$ 等の含有量が多いと、チャンキイ黒鉛(以下、CGと記す)が多量に晶出する傾向が非常に強くなる。CGは、厚肉部の最終凝固域に晶出し易く、その領域の引張特性を大きく低下させるために好ましくない<sup>11)</sup>。

この度、ガスタービンの耐熱部品として高Siを含むFCD材を製造した。この部品は、平均肉厚が130mmであり、上述の観点からすると、多量のCG晶出が予想された。加工により肉厚の約半分が削り取られるため、CGが晶出していれば、加工面に露出する恐れがあった。本研究では、この部品へのCG晶出防止対策を検討したので、以下に紹介する。

### 2. 実験方法

#### (1) 凝固冷却カーブの測定

3.0%Si含有FCDの凝固特性を把握し、CG晶出防止対策を検討するため、厚肉供試材(図1)の熱分析を行った。凝固制御の生データを取るため、同じ形状・寸法に対し冷金の有無の供試材を同時に鑄込んだ。熱電対は、Kタイプを使用した。

#### (2) CG晶出傾向とその対策

##### ①化学成分

仕様規格範囲内でSi量を変化させ、CG晶出傾向を調査した。この試験では、本体付供試材の引張特性確保の予備試験をも兼ねた。マイクロ組織チェック用の供試材として、ガスタービン部品の平均肉厚を考慮した厚肉供試材を鑄込んだ。その寸法・形状を図2に示す。マイクロ組織は、湯道に垂直な中心線断面にて観察した。

##### ②凝固冷却の制御

上述の中心線断面は、CG晶出の場合、その分布が左右でほぼ対称となることが予想されたことから、一部冷金を設置し、CG分布の動きを観た。更に、全面に冷金を設置した場合の効果も調査した。

#### (3) 本体付供試材における引張特性の確保

当材料は、フェライト系であるにも拘わらず、肉厚70mmの本体付供試材にて引張強さ $\sigma_B \geq 490$ が要求された。このため、Si量を高めてフェライト地を強化する必要があった。しかし、Si量の増加は、CG晶出につながる。このため、Si量を高めて $\sigma_B$ を確保した上で、冷金によるCG防止が必要とされた。Mo量が高いために、不適切な冷金の設置はチル発生を誘発するので、好ましくない。

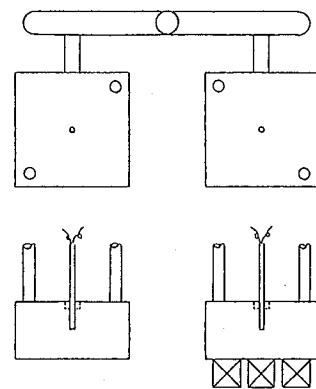


図1 熱分析用供試材(□300×<sup>t</sup>150mm)の形状・寸法

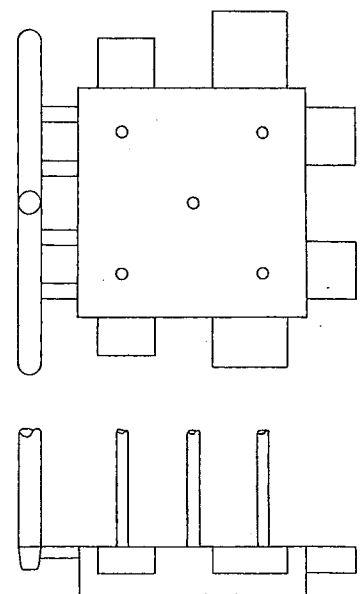


図2 冷却制御方案検討用の厚肉供試材(□600×<sup>t</sup>130mm)

(4) 凝固シミュレーション

図2におけるCG晶出現象を、コンピュータによる凝固シミュレーションにて解析した。シミュレーションに際し、上述の凝固冷却カーブ測定結果を基礎物性として使用した。その結果を基に、実製品の冷却制御方案を検討した。

(5) CG 晶出部の超音波特性

鑄放し状態で内部へのCG晶出有無を非破壊的に検出するため、CG晶出部と球状黒鉛(SG)晶出部の超音波特性を比較した。

3. 実験結果

(1) 凝固カーブ

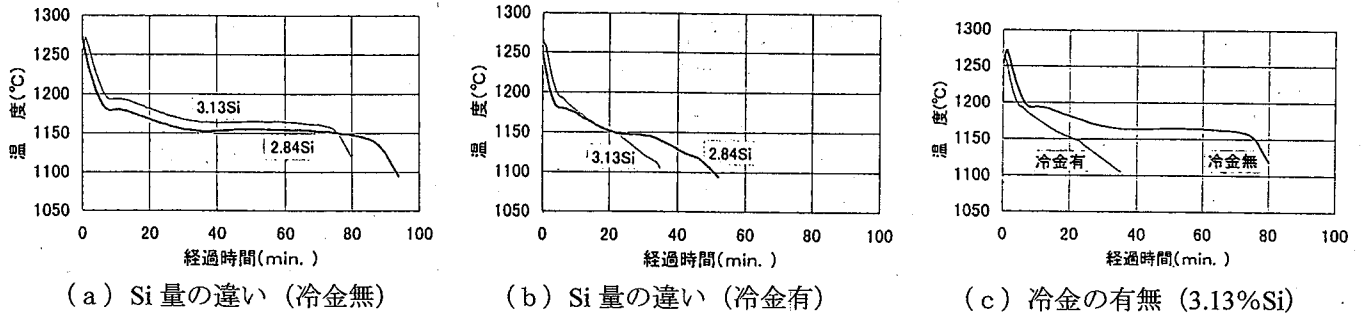


図3 熱分析結果(凝固カーブ)

Si量の増加に伴い、初晶及び共晶温度が上昇する傾向を示した(図3 a)。冷金有では、初・共晶共に明確な定点を示さなくなる(図3 b)。鑄込み温度が高いと、その分凝固時間が長くなる傾向にあった(図3 a, b, 表1)。冷金効果が明確に分かる凝固カーブの例を図3 c に示す。

表1 熱分析結果

Si量 %	冷金	鑄込み温度 °C	初晶温度 °C	共晶温度 °C	再解温度 °C	初晶までの時間 分 秒	凝固時間 分 秒
2.84	無	1355	1180	1155	3	7' 03"	84' 06"
	有		1180	1148	0	4' 06"	29' 30"
3.13	無	1341	1193	1165	1	6' 40"	75' 10"
	有		1194	1154	0	4' 00"	22' 50"

(2) CG 晶出傾向

CG 晶出傾向を把握するため、化学成分及び冷却条件を変化させて数多くの厚肉供試材(図2)を鑄込んだ。その代表的な結果を表2に示す。冷却条件が一定の場合(供試材 No. 1~3)、Si量の増加と共にCG晶出量が増加し、約3.10Si以上でその量が飽和した。このことから、実製品では、出来る限り低くSiを抑えた方が、CG 晶出防止に効果的であることが分かった。これら3つの供試材には、平面の一部に冷金が設置してある。CGは、冷金直下を避けて晶出する傾向を示した。このことから、冷金による凝固制御がCGに有効なことを見出した。

そこで、次にSi量を少し下げて、更に冷金を増加させた実験を行った。その結果を表2の供試材 No. 4, 5に示す。同じCHの湯を全面冷金と冷金皆無の厚肉供試材鑄型(図2)に鑄込んだ。その結果、2.8%台のSi量でも冷金なしにCGを防止することは出来なかった。反面、冷金により確実にCG防止が可能なが分かった。

表2 冷却及び化学成分条件とCG 晶出量との関係

供試材 No.	冷 金	化学成分 (Mass%)					CG量 (面積率%)
		C	Si	Mo	Mg	x CE	
規 格	—	3.20 ~3.50	2.60 ~3.40	0.70 ~0.90	<0.07	—	無(0)
1	一部	3.31	2.96	0.78	0.046	— 4.30	少(20)
2	一部	3.22	3.13	0.75	0.046	— 4.26	多(58)
3	一部	3.33	3.24	0.78	0.048	— 4.41	多(60)
4	全面	3.12	2.82	0.75	0.051	○ 4.06	無(0)
5	無						多(39)

x: 特殊成分

(3) 本体付供試材の強度

表2に示す成分の□600×t130供試材に肉厚70mmの引張試験用供試材を付けて鑄込み、その引張特性を調べた。その結果を表3に示す。供試材4の条件が、CG晶出の危険性が少なく、尚且つ引張特性も規格を満足させられるとの結論を得た。

表3 引張試験用供試材(肉厚70mm)の引張特性

供試材 No.	0.2%耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	絞り (%)
規格	≥ 350	≥ 490	≥ 8	≥ 8
1	357	507	20	20
2	420	547	19	20
3	363	505	18	14
4	366	521	18	18
5	342	500	17	17

(4) 凝固解析

シミュレーション結果とCG晶出傾向との相関を調べた。その結果を図4に示す。最上段に冷金方案とそれに対する実際のCG晶出領域を示した。その他の項目は、凝固シミュレーションによる結果である。冷金無と一部冷金については、CG晶出領域とシミュレーション結果の各項目との間に、比較的良好な相関を示した。今後、n値を増やせば、何らかの方向性が出てくるものと思われる。

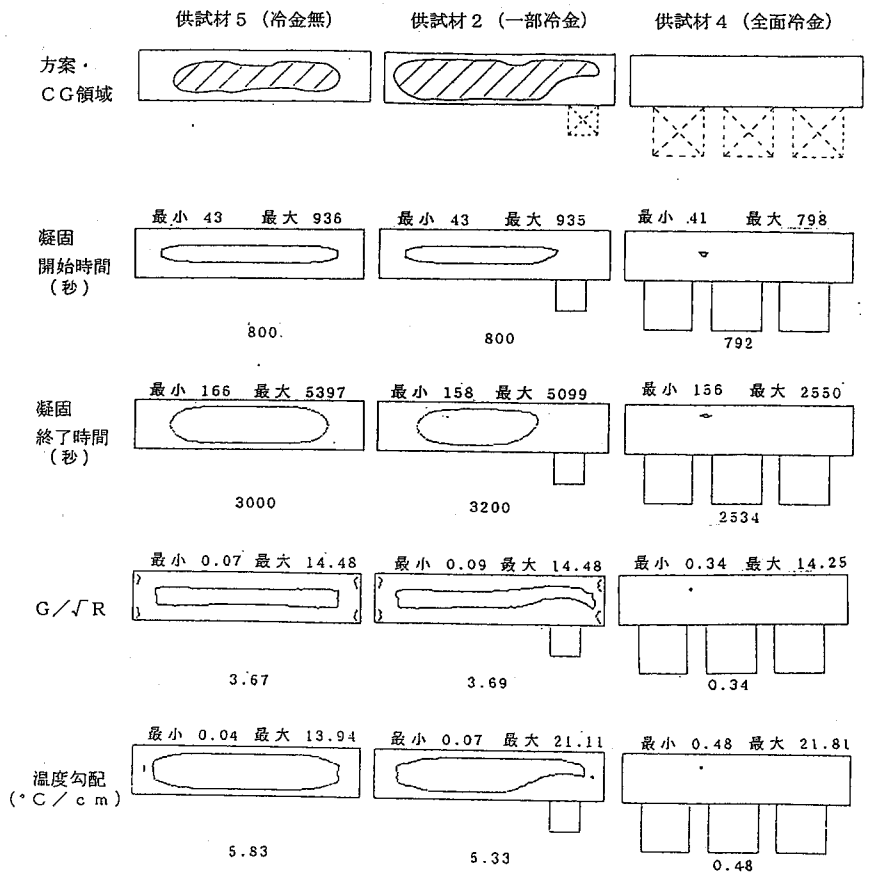


図4 CG発生傾向と凝固シミュレーションとの対応

(5) UT結果

CG晶出部は、SG部より超音波の減衰が大きかった。具体的には、同感度での多重エコー数の差、100%B1エコーを得るための感度の差となって現れた。当然の事ながら、超音波伝播速度にも差が出た。

例えば、CG部 5531m/sec.  
SG部 5609m/sec.

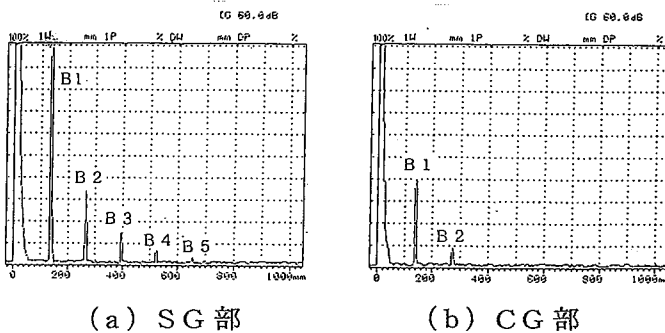


図5 探傷感度60dBにおける多重エコー特性

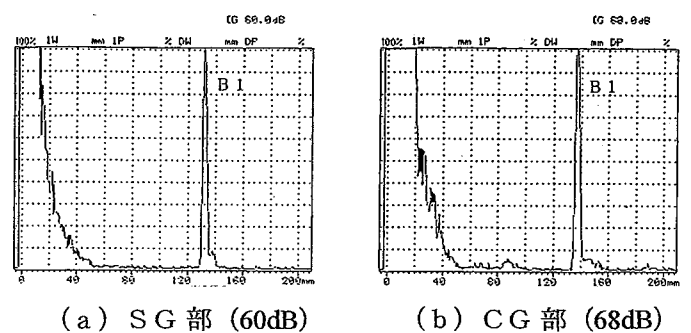
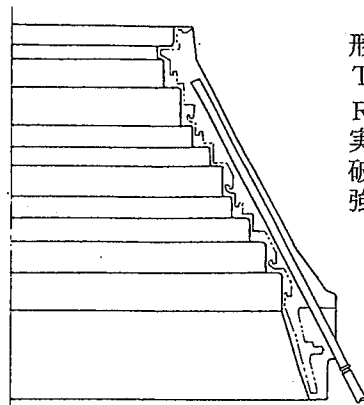


図6 100%B1エコー検出に要するdB値とエコー特性

#### 4. 実製品への適用

上述の基礎凝固シミュレーション結果を参考に、実製品の凝固制御方案を検討した。その結果、多量の冷金を必要とすることとなった。正加工後、表面への引巢の発生及びCGの晶出は見られず、UTによる内部への引巢も検出されなかった。本体付供試材の引張特性も、仕様規格を十分に満足する結果を得た。現在まで、品質は安定して推移している。実製品の概要を図7に示す。



形状  $\phi 3100 / 2100 \times H1400\text{mm}$   
T<sub>Ave.</sub> 130mm  
RW 4300Kg  
実線 鑄放し形状(鑄ぐるみパイプ 32本)  
破線 正加工形状  
強度 本体付供試材にて保証

図7 高シリコンFCD適用の厚肉ガスタービン部品

#### 5. まとめ

厚肉鑄物にとっては難鑄造性となる高Si・Mo含有FCDでも、適切な処置を施せば、高品質なものの製造が可能となった。今回の研究についても、黒鉛球状化理論であるサイト説<sup>11)</sup>による現象の理解が大いに役立った。

#### 6. 謝辞

本実験遂行に際してご協力頂いた(株)宇部スチール技術課の瀧野一郎君、まとめに際してご協力頂いた同課の高野千晶さんに深く感謝します。

#### 7. 参考文献

- 1) S.I.Karsay and E.Campomanes, "Control of Graphite Structure in Heavy Ductile Iron Castings," Trans.AFS, 1970, 78, 85-92.
- 2) J.Zhou, W.Schmitz and S.Engler, "Investigation of the Microstructure of Spheroidal Graphite Cast Iron for Low Solidification Rates," Giessereiforschung, 1987, 39, No.2, 55-70.
- 3) N.Yingyi and Z.Zhu, "A Study of the Rare Earth Effect on Chunky Graphite Formation in Heavy Section Ductile Iron," Foundryman, 1988, 81, No.8, 390-398.
- 4) S.I.Karsay and R.D.Schelleng, "Heavy Ductile Iron Castings Composition Effect on Graphite Structure," Trans.AFS, 1961, 69, 672-679.
- 5) T.C.Xi, J.Fargues, M.Hecht and J.C.Margerie, "The Formation and Prevention of Chunky Graphite in Slowly Solidified Non-alloy Spheroidal Irons," Fonderie, 1985, 46, 14-23.
- 6) D.H.Wu, S.I.Karsay and R.D.Schelleng, "Nickel Alloyed Austenitic Ductile Iron Graphite Structure," Trans.AFS, 1961, 69, 725-730.
- 7) P.C.Liu, C.L.Li, D.H.Wu and C.R.Loper, Jr., "SEM Study of Chunky Graphite in Heavy Section Ductile Iron," Trans. AFS, 1983, 91, 119-126.
- 8) J.Zhou, W.Schmitz and S.Engler, "State of Knowledge on the Microstructure in Spheroidal Graphite Cast Iron for Low Solidification Rates," Giessereiforschung, 1987, 39, No.2, 49-54.
- 9) N.L.Church and R.D.Schelleng, "Detrimental Effect of Calcium on Graphite Structure in Heavy Section Ductile Iron," Trans.AFS, 1970, 78, 5-8.
- 10) 糸藤; 私見
- 11) H.Itofuji, "Study on Graphite Spheroidization in Cast Irons," 京都大学学位論文, 1993.