

技術資料

진공 플라즈마 전자선(Vacuum Plasma Electron Beam) 기술의 원리와 응용

정용석*, 백홍구**

The Principles and Applications of the Vacuum Plasma Electron Beam Technology

Y. S. Chung*, H. K. Baik**

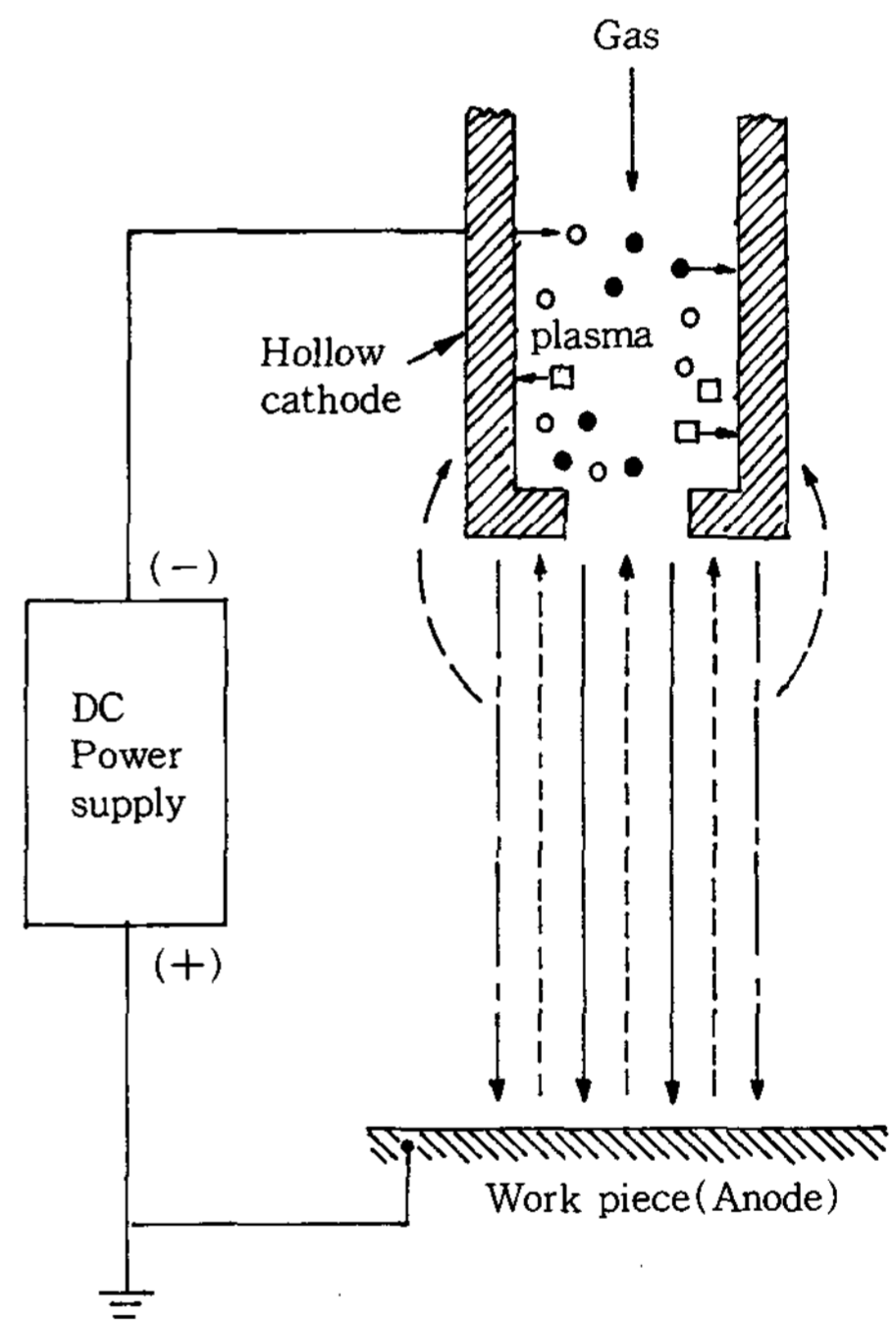
1. 서론

Ta, Nb, Ti, Zr 등과 같은 내열(Refractory) 금속이나 반응성이 큰 금속 등의 용해기술로는 전자선 용해법(High Voltage Electron Beam Melting)이나, 진공아아크 용해법(Vacuum Arc Melting), 진공 유도 용해법(Vacuum Induction Melting), 플라즈마 아아크 용해법(Plasma Arc Melting) 등이 알려져 있다. 그러나 이 방법들 중에서 전자선 용해법은 고진공($6.7 \times 10^{-3} \text{Pa} - 2.7 \times 10^{-2} \text{Pa}$)의 작업조건을 요구하며, 금속자체의 증발로 인한 손실이 발생한다. 또한 진공 아아크 용해법은 위와같이 반응성이 큰 금속의 정련효과에 기여하는 바가 적다.

본장에서는 이 두 방법의 단점을 해결할 수 있는 플라즈마 전자선 용해법의 원리 및 장단점을 기술하고, 전자선 용해법 및 플라즈마 아아크 용해법을 플라즈마 전자선 용해법과 각각 비교하였다. 한편 플라즈마 용해법으로는 Ta을 용해 정련하였을 경우의 불순물농도와 플라즈마 전자선 장치와 조업 예를 기술하였다.

2. 진공 플라즈마 전자선의 원리 및 장단점

진공 플라즈마 전자선의 원리는 그림 1과 같이 원통형 음극(Hollow Cathode)으로부터 아아크(Arc)를 일으키어 플라즈마를 발생시키는 것이



Legend:
 ○ Electrons
 □ Positive Ions
 ● Gas molecules
 ← Positive Ion
 → Electron generated in plasma
 → Electron from cathode surface

그림 1. 플라즈마 전자선 토오치(Torch)의 가열원리

* 연세대학교 대학원

** 연세대학교 금속공학과

다. 반응노내의 진공도를 10^{-3} Torr로 유지시키며, 원통형 음극관과 장입물(양극)을 고주파 발생기를 포함하고 있는 직류전원으로 연결한다. 가스의 유량은 $2.0\text{cm}^3/\text{s}$ 로 일반적으로 고순도의 아르곤을 많이 사용하며, 미량의 아르곤 가스가 원통형음극에 들어갈 때 고주파 아아크를 발생시키면 가스분자들은 이온화되고 저압(Low-Pressure)의 플라즈마가 발생한다. 발생된 플라즈마 중에서 양이온들은 음극의 내부표면에 충돌하여 표면온도를 2400K까지 올린다. 음극의 온도가 충분히 올라가면 열전자가 발생하고 음극주위의 전자밀도는 급격히 증가한다. 그 후에 음극과 양극에 주 전원이 걸리면, 원통형음극에서 방출된 전자들은 양극으로 가속되어 강력한 전자선을 만들어 장입물을 가열하거나 용해한다. 플라즈마 전자선 용해의 전형적인 장치는 그림 2와 같다.

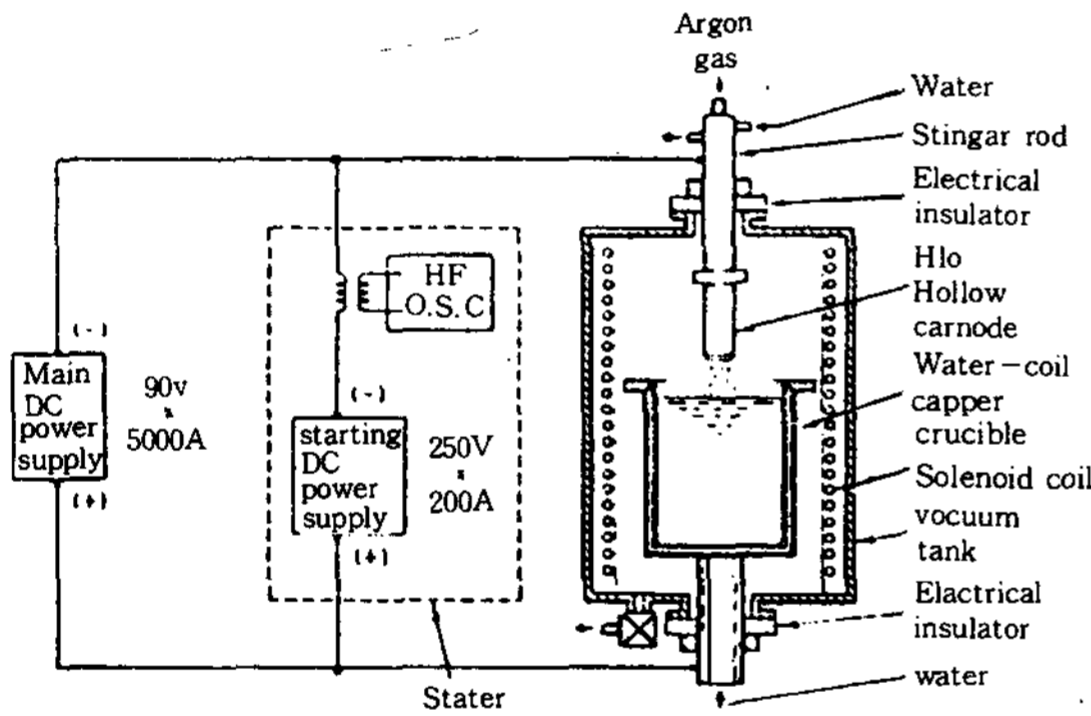


그림2. 플라즈마 전자선 장치

한편 플라즈마 전자선 용해법의 장점과 단점은 다음과 같다.

(장점)

- 1) 매우 안정된 열원을 얻을 수 있다.
- 2) 전극간의 거리에 의존하는 열 효율은 65-90%에 이른다.
- 3) 사용되는 전압이 20-100V 정도이므로 X선 발생의 위험이 없다.
- 4) 플라즈마 선의 형상을 바꿀 수 있다.
- 6) 용해 금속의 오염이 적다.
- 7) 전자선 용해보다 저진공을 사용하므로 반응성 원소를 포함하는 합금의 용해에 이용될 수 있다.

(단점)

- 1) 저전압, 고전압을 사용하므로 에너지 집속에 불리하다.

- 2) 사용되는 가스안의 불순물이 오염원이 되므로 고순도의 가스를 사용해야 한다.

3. 플라즈마 전자선 용해법과 전자선 용해법 및 플라즈마 아아크 용해법과의 비교

플라즈마 전자선 용해법과 전자선 용해법과의 비교를 다음 표 1에 나타내었고, 플라즈마 아아크 용해법과의 비교를 표 2에 나타내었다.

위 표 1에서 보는 바와 같이 플라즈마 전자선 용해법은 전자선 용해법에 비하여 비교적 저진공 하에서도 탈가스(Degassing)효과는 비슷한 수준을 가지며 목적금속의 증발손실도 상당히 적고, 조업도 쉬운 것을 알 수 있다.

또한 표 2에서 보는 바와 같이 플라즈마 전자선 용해법은 플라즈마 아아크 용해법에 비하여 적은 가스 유량을 사용하여 오염이 없는 용해나 정련에 이용되는 것을 알 수 있다.

4. 플라즈마 전자선 용해법에 의한 Ta의 정련 효과

Ta는 내열, 내식성이 뛰어나므로 Ti과 함께 화학공업과 전기, 전자공업 등에 널리 사용되는 금속으로 카바이드를 형성하여 고온합금에 이용되며 터빈의 단결정 브레이드(Single Crystal Blades)의 합금 첨가제로 많이 이용되고 있다. 한편 산소, 질소, 탄소 등과 친화력이 커서 이 불순물을 제거하는 것이 Ta정련에 주된목적이 될 것이다.

다음 표 3은 Ta을 정련하기위하여 플라즈마 전자선용해법을 사용할 때의 작업 조건의 한 예이며, 표 4와, 표 5는 각각 위 작업 조건에서 Button용해와 Drip용해 후의 Ta의 정련효과에 대한 자료이다. 표 4와, 표 5에서 보는 바와 같이 플라즈마 전자선 용해법을 이용하여 상당한 정련 효과를 얻을 수 있다.

5. Ulvac 사(社)의 플라즈마 전자선 용해 장치

Ulvac 사(社)의 Ti스라브(Slab)용해 및 주조를 위한 플라즈마 전자선 용해 장치는 그림 3과 같다. 이 장치는 각각 400Kw 용량으로 플라즈마 건을 여섯개를 설치하여 총 2400Kw의 전력용량

표 1. 플라즈마 전자선 용해법과 전자선 용해법의 비교

	플라즈마 전자선 용해법	전자선 용해법
용해대상물질	형태 : 다공질 분말, 분말, 다공체, 선삭(Scrap) 장입방법 : 진동법(Vibrating Method) 소모성 전극이나 봉재	
용해시간	용해로 안의 압력에 영향이 없으므로 용해속도를 증가시킬 수 있다.	용해로 안의 압력에 의해 큰 영향이 있다.
용해속도 조절	조정이 쉽다	압력에 의한 제한이 없는 한 조정할 수 있고, 속도가 매우 느린 경우에는 증발 손실이 많다.
조업시 진공도	$10^{-1} - 10^{-3}$ Torr	$4 \times 10^{-4} - 10^{-5}$ Torr
용해 표면	아르곤 분위기	
탈가스(Degassing)효과	고순도의 아르곤을 사용할 때 전자선 용해법과 실제적으로 같은 효과를 나타낸다.	매우 큰 효과를 나타낸다.
조업	매우 쉽다	고전압으로 인한 방전 및 X-선 으로부터의 보호가 요구된다.
안정성	안정성이 매우 높다.	안전성을 위한 방출안정화 장치(Emission stabilizer)가 필요하다.
5Kw를 내기 위해 요구되는 전력		
(a)가열전력	7.0kVA	9KVA
(b) 펌프 및 조절에 필요한 전력	3.5KVA	6KVA
5Kw를 낼 때 필요한 냉각수량	900L/h	1500L/h
1Kw당 상대적인 비용	36	100

표 2. 플라즈마 전자선 용해법과 플라즈마 아아크 용해법의 비교

참고 : 아래표는 다음 조건하에서 계산되었음
 ◦ 직류 전원의 효율은 70%라 가정함
 ◦ 진공펌프의 전력을 플라즈마 전자선 용해의 경우 3kwh 이고 플라즈마 아아크 용해의 경우는 0.5kwh이다.

	플라즈마 전자선 용해법	플라즈마 아아크 용해법
조업시 진공도	중 진공도(Medium Vacuum) ($10^{-3} - 10^{-1}$ Torr)	대기압 (~760Torr)
가스분위기	불활성가스, 환원성가스	
전압과 전류	저전압, 고전류, 직류전원을 사용하는 것이 유사함(AC도 사용 가능)	
가스유량 (10Kw를 낼 때 고순도 아르곤의 경우)	0.03 L/min	45 L/min

	플라즈마 전자선 용해법	플라즈마아아크 용해법
요구전력 (kwh/kg) 적용	17kwh 오염이 완전히 제거되며 정련효과를 얻을 수 있는 용해나 가열처리에 사용	14.5kwh 고속 절단, 용사, 용접, 질소가스 플라즈마에 의한 표면 경화 및 AISI4340, A-286, Hene 41, 17-4PH등의 용해에 사용

표3. Ta 용해시 플라즈마 전자선 용해의 최적조건

조업시 진공도, Pa(Torr)	4.7×10^{-1} (3.5×10^{-3})
VPEB 출력 전압, V	73
전류, KA	2.2
Wattagem JW	160
촉점을 맞추기 위한 자기장(Gause)	120
음극과 도가니 사이의 거리(mm)	140
주상크기 I.D.mm	105

시 료		불 순 물 (ppm)						
		O	N	C	Fe	Si	Ni	Ti
#1	장 입 물	3500	390	2830	30	50	<10	<10
	주 피	35	10	<10	<10	20	<10	<10
#2	장 입 물	5400	90	4300	270	520	30	50
	주 피	30	20	<10	10	30	<10	<10
#3	장 입 물	5400	90	4300	270	520	30	50
	주 피	50	20	50	10	20	<10	<10

표4. Ta bottom 용해에 대한 플라즈마 전자선용해법의 정련효과

참고: 장입물 #1-소결된 선삭(resintered pellets scrap)
 #2-소결 및 양극화 처리된 선삭(Sintered and anodized pellets scrap)
 #3-선재선삭(Wire scrap)
 용융속의 유지시간 A-5분, B-15분

시 료		불순물(ppm)		
		O	C	Fe
#1 장입물	Bottom 주괴	3500	110	60
	"	A	25	<10
#2 장입물	Bottom 주괴	8700	260	35
	"	A	28	<10
#3 장입물	Bottom 주괴	810	97	1550
	"	A	15	<10
		B	15	<10

표5. Ta drip 용해에 대한 플라즈마 전자선 용해법의 정련효과

참고: 장입물 #1-소결된 선삭
 #2-선재선삭
 #3-크루드 선삭 분말(Crude scrap of powder)
 아르곤 가스는 용접등급(welding grade)
 용해속도 #1-6kg/hr
 #2-8kg/hr
 #3-5kg/hr

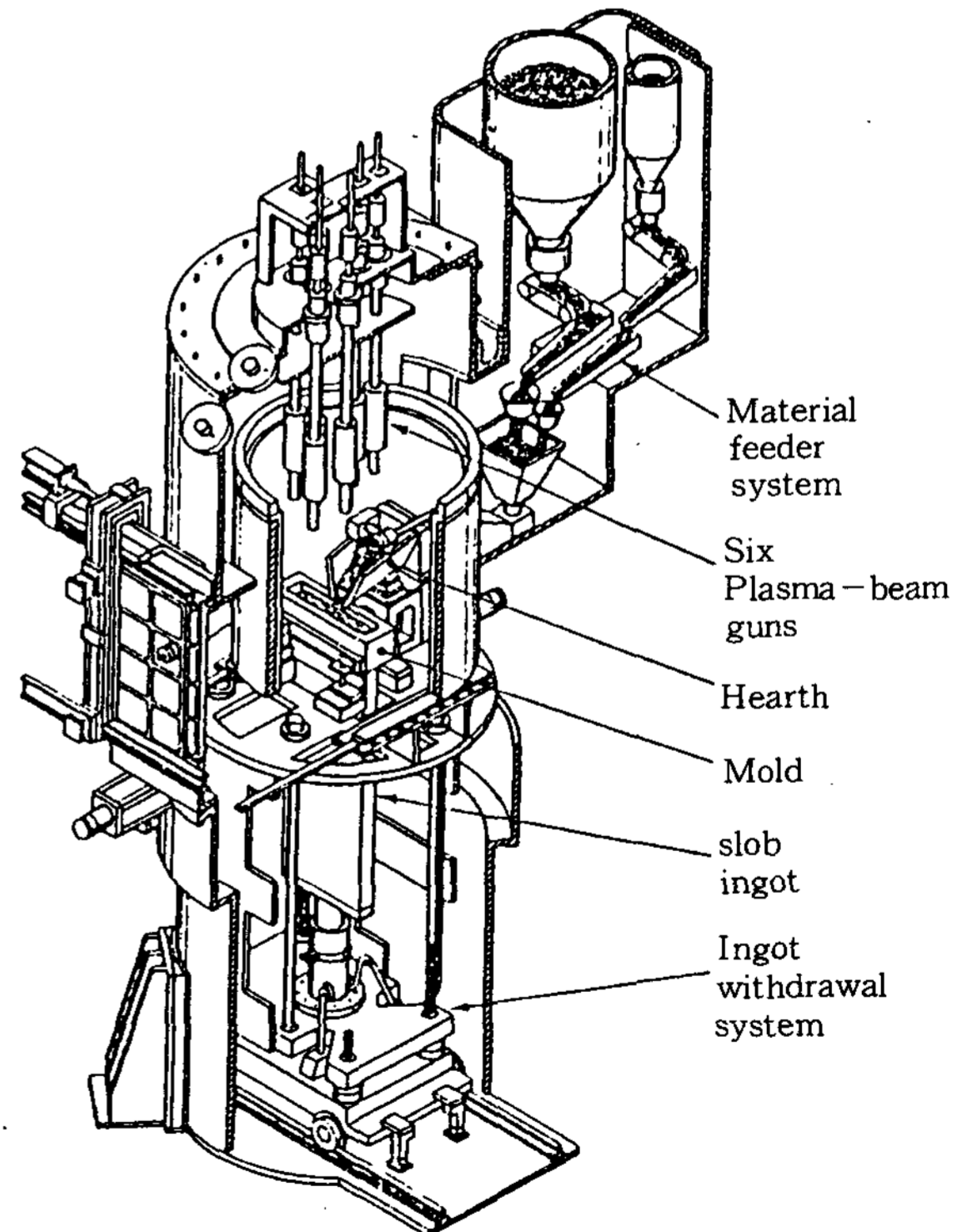


그림3. Ti 슬라브 주괴(Slab Ingot) 주조를 위한 2400Kw 플라즈마 전자선 장치(일본 Stainless Steel)

으로 Ti금속 및 합금의 슬라브 주괴(Slab Ingot)를 3톤 정도 주조할 수 있다.

플라즈마 전자선 용해로는 다음과 같이 구성되어 있다.

- 1) 진공장치, 냉각장치
- 2) 수냉 구리 주상(Copper Hearth)
- 3) 주괴 주형(Ingot Mold)
- 4) 재료 장입 설비(Material Feed System)
- 5) 배기장치
- 6) 삼상 직류 전원

여섯개의 건 중에서 세개의 플라즈마 건은 응고되는 슬라브 주괴(Ingot) 위에서 금속용해를 유지하는 역할을 한다. 한편 조업시 진공도는 10^{-3} - 10^{-1} Torr를 유지하며 전자선 장치처럼 솔레노이드 코일을 사용하여 플라즈마 전자선을 집속한다. 전형적인 작업조건은 표 6과 같다.

표6. 3톤 Ti 슬라브 주괴 (slab ingot) 제조를 위한 플라즈마 전자선 용해의 전형적인 조업 조건.

입력전력	주상 $8.5 \text{ kA} \times 82 \text{ V} = 697 \text{ kw}$ 도가니 $16 \text{ kA} \times 73 \text{ V} = 1,168 \text{ kw}$ 계 1,865 kw.
조업시 진공도	$18 \times 10^{-3} \text{ mmHg}$ (토오치를 통과하는 아르곤의 운속이 15 NL/min일때)
용해속도	5.3 kg/min
전력소모	9,000 kwh/ton

최근에 Ulvac에서는 Ti용해를 위한 플라즈마 전자선 장치를 개선하여 4톤 용량의 주괴를 주조할 수 있으며, 톤당 전력을 6200Kwh로 낮추었다.

6. 결 론

플라즈마 전자선 용해법은 전자선 용해법 보다 안정적인 조업을 할 수 있으며, 장치 제어가 쉽다. 또한 장치 설비도 저렴하나 전자선 용해법 수준의 높은 정련 효과를 얻을 수 있다. 이 방법으로 내열(Refractory)금속이나 반응성이 큰 금속등의 용해 및 정련의 큰 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. N. N. Rykalin : Pure and Applied Chemistry, 48 (1976) 179-194
2. Motomu Suzue, Siji Sano etc : Proc. 7th ICVM, (1982) 1300-1307
3. G. K. Bhat : J. Vac. Sci. Technol, 9 (1972) 1344-1350
4. G. K. Bhat : Plasma Technology in Metallurgical Processing, (1987)168-171
5. P. Kumar : JOM, (1990) 32

◇ 表 紙 說 明 ◇ = 鐵 鑊 =

충청북도 유형문화재 제143호
소재지 : 충청북도 보은군 내속리면 범주사내
이것은 신라성덕왕 때(720) 조성되었다고 하는 철솥으로 옛날 범주사가 한창번창하여 삼천승도가 운집하여 있을 당시 장술·혹은 밥술으로 사용하였다고 전한다.
크기는 높이 1.2m 직경 2.7m, 둘레 10.8m나 되는 거대한 솥이다.