

DUPIC 핵연료봉 제조를 위한 핫셀 봉단레이저용접 연구

A Study on the Endcap Laser Welding for DUPIC Nuclear Fuel Elements in Hot Cell

김수성, 김웅기, 김종호, 이정원, 양명승

한국원자력연구소
대전시광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구는 중수로용 DUPIC 핵연료봉의 핫셀 원격 봉단용접 수행을 위한 것으로, 원자로 내에서 핵연료 연소시 용접부의 안전성과 연료봉의 성능향상을 고려할 때 반드시 선행되어야 할 일이다. DUPIC 핵연료봉의 봉단용접은 핵연료제조의 조립공정에서 지르칼로이-4 피복관에 소결체를 장입한 후 봉단으로 밀봉하는 공정이다. 본 연구에서는 핫셀작업을 위한 레이저용접의 광섬유 전송조건 및 레이저변수의 최적화 그리고 지르칼로이-4 용접부에 대한 특성조사에 관한 것으로, 중수로 연료봉의 모의시편을 이용하여 실험을 수행하였다. 또한 핫셀 작업시 핵연료봉 제조를 위한 용접챔버 및 주변장치를 설계하여 제작하였으며, 조사연료봉 및 중수로 연료봉의 종류에 따른 원격용 치공구 및 용접지그를 보완 개선하였다.

Abstract

The selecting of proper welding conditions for end cap closure of nuclear fuel element in hot cell operation is considered important in respect to the soundness of weldment and the improvement of the performance of nuclear fuels during the operation in reactor. This study is to investigate the optimum conditions for laser welding and optical fiber transmission, and to evaluate the characteristics of laser welded specimens. Welding chamber and related devices for hot cell operation were designed and fabricated. The remote fixtures and welding jig for irradiation capsules and nuclear fuel elements were also manufactured and improved.

1. 서론

최근 선진국에서는 이미 새로운 핵연료개발 및 조사시험용 캡슐제작 등이 활발히 진행되고 있음에 따라 핵연료제조 및 특수용도의 연료봉제작에 대한 고방사성의 핫셀 장치내에서 원격으로 용접작업이 수행되어지고 있다.^[1,2] 이때 기존의 용접방법에 비해 우수한 가공능력을 가진 레이저는 현재 광섬유(fiber)의 전송방법이 널리 보급되면서부터 활발히 응용되고 있다. 여기서 레이저용접은 차폐시설내에서 원격으로 광섬유전송이 가능하다는 특성 때문에 용접작업이 용이하나 그 반면에 보다 높은 용접품질을 확보해야 한다는 까다로운 점도 있다. 핵연료제조의 공정에 있어서 연료봉의 봉단마개용접(end cap welding)은 핵연료다발 조립공정의 전 단계로서 지르칼로이-4 피복관에 소결체를 장입한 후 봉단마개로 밀봉하여 제조하는 작업이며, 용접품질면에서도 연료봉의 원주방향 어느 한 지점에서라도 결함이 있을 경우 연소중에 핵분열 물질이 누출되어 안전성과 직결되는 문제를 야기한다는 것을 고려하면 높은 신뢰성이 요구된다.^[3] 본 연구는 펄스형 Nd:YAG 레이저 및 원격전송이 가능한 광섬유를 이용하여 중수로(PHWR)용 핵연료봉의 지르칼로이-4 봉단마개 밀봉을 위한 레이저용접의 최적화, 용접샘플 제작, 그리고 원격용 치공구 및 용접지그를 개발하기 위한 것이다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 핫셀장치의 DUPIC 연료봉 봉단용접을 위해서 500W Nd:YAG 레이저 시스템에 적합하도록 Fig. 1과 같이 원격 용접챔버를 설계하여 제작하였다. 원격용 용접 챔버는 몸체, 회전구동부, 봉단삽입부, 광섬유 및 커플러부를 들 수 있으며, 2000년 3월말까지는 Fig. 2에서 나타난 바와같이 용접챔버를 이용한 모의성능시험을 수행하였으며, 2000년 6월부터는 실제의 IMEF M6 핫셀에 레이저용접장치를 설치하여 연료봉 샘플시험을 수행하였다.

또한 Nd:YAG레이저에서 발진된 빔을 원격으로 전송될 경우 유연성이 좋고 가늘고 긴 광섬유를 사용하게 된다. Fig. 3에서와 같이 핫셀 내부에 있는 용접챔버와 핫셀 외부의 레이저시스템간의 거리가 약 10m이므로, Fig. 4의 핫셀 윈도우에서 볼 수 있듯이 용접챔버, 광학커플러부 및 광섬유연결장치가 연료봉 밀봉용접에 사용되도록 적합하게 구성되어 있다. 핫셀용 광섬유연결부는 핫셀내부에서 고방사성의 영역을 고려해 볼 때 용접챔버에 광섬유연결부를 사용하였으며, 보수작업이 요구될 때 원격조정기를 사용하여 파손된 광섬유를 즉시 교환 가능하도록 설계 및 제작하였다. 이것은 광섬유전송시 핫셀 외부의 광학입구커플러에서 핫셀내부의 광섬유연결부까지 고정시켰으며, Fig. 3과 같이 핫셀내부의 출구커플러까지 오염될 수 있는 광섬유를 교체하도록 설계되었다.

본 용접장치는 핫셀내부에서 DUPIC 연료봉의 봉단마개 밀봉작업에 사용되어야 하므로, 중수로용 지르칼로이-4 피복관인 연료봉 양끝단에 봉단마개가 압입될 수 있도록 준비되었으며, 마지막으로 연료봉 봉단결합부가 원주방향으로 밀봉용접이 수행된다. 따라

서 이에 모든 중수로용 연료봉 및 조사연료봉 등의 원주용접이 적합하게 수행될 수 있는 특수용도의 장비로서 활용할 수 있도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 봉단용접부의 특성조사

본 연구에서 펄스형 Nd:YAG 레이저 용접실험의 중요한 변수로는 펄스폭, 반복율, 펄스에너지, 용접속도 및 보호가스 유량 등이 있다. 봉단 레이저용접의 최적화에서는 중수로용 연료봉의 양호한 용접을 얻기 위해서 앞의 나열된 변수중에서 레이저조건에 대한 실험과 고찰이 필요하다. 핫셀 원격용접용 챔버는 레이저의 전송을 위해서 광섬유를 이용하였으며, 전용 회전제어부가 작동될 수 있게 하였다. 또한 용접챔버 내부로 보조가스가 유입되어 집광렌즈를 냉각시키고, 동시에 용접시편에서 발생하는 미세한 금속가루 및 스파터로부터 보호하게끔 하였다. 연료봉의 초점위치에서 집속된 레이저의 직경은 2.0mm 정도이며, 또한 본 실험에서는 레이저빔 형태 및 강도를 나타내는 TEM multi-mode로 사용되었다.

DUPIC 연료봉에 사용된 봉단마개는 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 CANFLEX 형태의 연료봉에서 선정된 기하학적 형상을 고려하여 레이저용접에 적합하도록 설계 제작되었다. DUPIC 연료봉의 용접실험을 위해서 Table 1과 같은 레이저조건으로 용접이 수행되었다. 용접실험후 각각의 변수들(펄스폭, 반복율, 펄스에너지)에 대해 광학현미경을 이용하여 용접부의 깊이를 나타내는 용입(penetration depth)과 용접부의 표면에서 용융된 폭을 나타내는 비드폭(bead width)을 검사하였고, 용접부와 열영향부의 크기를 알아보기 위해서 금속조직 검사를 실시하였다.

Fig. 6은 본 실험에 사용한 레이저발전부의 충전전압을 변화시켰을 때 DUPIC 연료봉시편의 용입과 비드폭의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 레이저출력의 증가에 따라 용접시편에서 나타나는 비드폭과 용입의 정도를 보여주고 있으며, 대체로 비드폭과 용접깊이가 모두 증가함을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 실제로 중수로용 연료봉을 사용했을 때 비드폭과 용입단면의 사진을 보여주고 있다. 여기서 DUPIC 연료봉 용접을 위해서는 Fig. 7에서 나타내듯이 피복관의 두께가 0.355mm 이므로 펄스에너지가 적어도 25J 이어야 하며, 즉 레이저출력이 160W부터 180W 범위에서 적절함을 알 수 있었다. 이때 얻어지는 연료봉의 비드폭은 2.4mm 이다. Fig. 8은 레이저출력 240W 에서의 비드폭과 용입을 보여주고 있다. 여기서 출력 180W에서는 용입깊이가 0.9mm 정도이나 반면에 출력 240W에서는 1.5mm 이상에서 크게 용융됨을 알 수가 있었다. 그리고 레이저용접후 육안관찰에서는 레이저출력이 180W인 경우 비드가 매끈하게 나타났으나, 반면에 출력 200W이상인 경우에는 비드가 거칠고, 용접부의 spattering 현상이 발생하여 연료봉 상단용접부의 주변에 금속증기로 인한 미세한 산화 지르코늄분말이 많이 산재해 있

음이 관찰되었다.

봉단용접에 있어서 기하학적 형상(joint geometry)은 매우 중요한 의미를 갖는다. 용접이음의 구조개선은 제살붙이기(autogenous) 방법이 유리하며, 용접중에 응고가 한 방향으로 일어난다면 용융하기가 매우 용이해 질 수 있다. 본 실험에서는 봉단마개 구조 형상에서 filler를 가지는 시편 A와 filler가 없는 시편 B를 사용하여 Fig. 9와 같이 레이저출력에 따른 용접부의 비드와 용입특성을 살펴보았다. Fig. 9에서 나타내듯이 시편 A와 B는 레이저출력이 커질수록 비드 및 용입이 모두 증가하는 것을 볼 수 있었으며, 이때 시편 A는 B보다 볼록형태의 비드와 작은 용입을 얻었다. 일반적으로 레이저용접은 순식간에 molten pool 형성을 쉽게 일어나게 해주며 큰 용입을 가진다. 그러나 filler를 가지는 시편 A는 시편 B에 비해 대체로 용융되는 부피가 커져서 용입이 감소되는 현상을 보여준 것으로 판단된다.

레이저용접시 레이저가 재료표면에 도달되면 플라즈마형성(plasma formation)으로 plume현상이 발생하게 된다. 이것은 레이저조사시 재료표면에서 발생하는 금속증기(metal vapor)반응으로 장시간 사용시 커플러의 집광렌즈의 손상을 줄 위험이 있으므로 고려되어야 한다. 이때 사용될 보호가스의 압력, 커플러의 노즐직경, 커플러의 노즐입사각 및 재료와 노즐간의 거리에 따라 매우 복잡하게 작용된다. 또한 용접과정에서 보호가스와 plume 현상은 매우 밀접한 관계에 있으므로 용접특성에 크게 영향을 미친다. 본 실험에서는 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 레이저조사시간 200s, 레이저출력 120W에서 헬륨유량을 변화시켰을 때 노즐입구의 집광렌즈에서 달라 붙은 산화지르코늄의 양을 비교한 것이다. 이때 재료와 노즐간의 거리를 12mm, 노즐직경을 5, 7 및 13 mm로 하여 수행되었다. 노즐직경 5mm 및 7mm로 사용할 경우 헬륨유량 40LPM 이상에서는 달라 붙은 산화지르코늄의 양이 적음을 알 수 있었으나, 헬륨유량 90LPM 에서는 재료표면에서 비드가 약간 퍼짐 현상으로 관찰되었다. 따라서 봉단용접의 적정용입과 비드가 매끈하게 얻기 위해서는 커플러의 노즐직경이 7mm가 적절하였으며, 헬륨유량은 30LPM 내지 60LPM 범위로 사용될 경우 건전한 용접부를 얻을 수 있었다.

3.2. DUPIC 연료봉의 샘플분석

본 연구에서 중수로용 DUPIC 연료봉은 Fig. 11과 같이 봉단마개 및 피복관의 외경 11.5mm 인 시편이 사용되었으며, 또한 핫셀장치에서 DUPIC 연료봉의 외경 11.5mm 및 13.08mm의 봉단용접에 활용하기 위한 원격용 치공구 및 용접지그를 Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 및 Fig. 15 에서와 같이 고안하여 사용되었다. Fig. 12는 핫셀 내부에서 원격조정기를 이용하여 11.65mm인 봉단마개를 피복관에 물릴 수 있게 봉단마개 홀더장치가 설치되었고, Fig. 13은 봉단마개가 홀더장치에 정확하게 물릴 수 있게 조정해 주는 봉단마개 삽입고정구가 준비되었다. Fig. 14는 핫셀 내에서 원격조정기를 이용하여 DUPIC 연료봉을 회전축에 정확하게 물릴 수 있도록 사용할 수 있게 가이드바가 준비되었고, Fig. 15는

연료봉이 척에 물리면 원격조정기를 이용하여 연료봉 길이에 맞게 용접위치를 정확하게 조절될 수 있도록 보여 주고 있다. Fig. 16은 광섬유 800um을 이용한 지르칼로이-4 봉단 용접 샘플의 모양을 나타낸 것이다. 여기서 펄스폭 7ms, 평균출력 180W로 봉단용접을 하였을 때, 비드폭은 2.4mm 이고 용입비(aspect ratio)는 대체로 0.4로 나타냈다. Fig. 16에서 나타내듯이 핫셀 창문을 통하여 레이저 용접된 연료봉의 상단부를 관찰할 수 있었으며, 이때 샘플제작된 용접조건은 회전속도가 6rpm, 보호가스 헬륨유량이 40 LPM이고, 펄스에너지가 적어도 25J에서 적절함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 핫셀에서 중수로용 연료봉을 레이저용접하기 위하여 원격용 용접장치 개발 및 연료봉 샘플제작의 적합조건을 조사한 결과가 다음과 같이 얻었다.

1. 봉단형상에 따른 용접부의 특성에서 filler구조를 가지는 시편 A는 filler구조를 가지지 않은 시편 B보다 작은 용입을 나타냈다.
2. 광섬유에 의한 레이저용접시 용접노즐의 직경은 7mm로 적절하며, 헬륨유량은 집광렌즈의 수명에 직접 영향을 받을 수 있으며, 이때 유량은 30LPM 내지 50LPM에서 좋은 비드와 용입을 얻을 수가 있었다.
3. 핫셀내의 원격 레이저용접시 중수로용 봉단마개용접의 적정 용입과 비드를 얻기 위해서는 펄스폭 7ms, 반복율 7pps 및 펄스에너지는 25J이 적절하였으며, 이때 회전속도는 6RPM으로 하였다.
4. 향후 DUPIC 연료봉의 봉단용접을 위해 추가로 보완되어야 할 사항은 연료봉의 봉단마개의 크기별로 용접치공구의 개선이 필요하고, 마지막으로 중수로용 연료봉을 이용한 지르칼로이-4 자격화 용접시험 및 승인이 필요하게 될 것이다.

감사

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] J. Saito, M. Shimizu : Development of Re-instrumentation Technology for Irradiated Fuel Rod, The 2nd Kaeri-Jaeri Joint Seminar on PIE Tech., KAERI-NEMAC/TR-32, (1995), pp.125-135
- [2] H. Sakai, H. Kawamura : New Apparatus of JMTR Hot Laboratory, Department of JMTR, The 2nd Kaeri-Jaeri Joint Seminar on PIE Tech., KAERI-NEMAC/TR-32, (1995), pp.65-77
- [3] P. T. Truant : CANDU Fuel Performance & Power Reactor Experience, AECL-MISC-250-3 Rev.1 (1983)

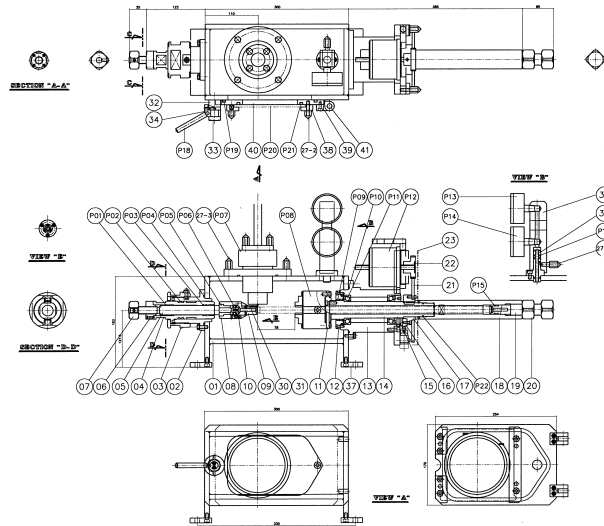


Fig. 1. Drawing of laser welding chamber.

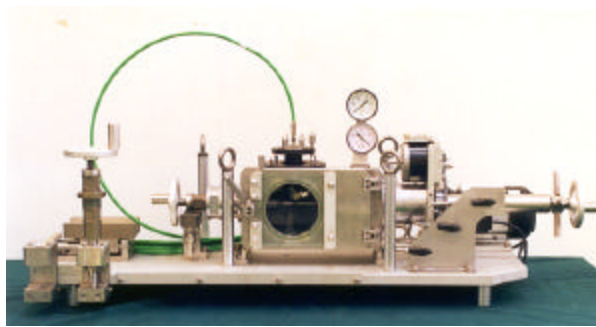


Fig. 2. Photograph of laser welding chamber using optical coupler.

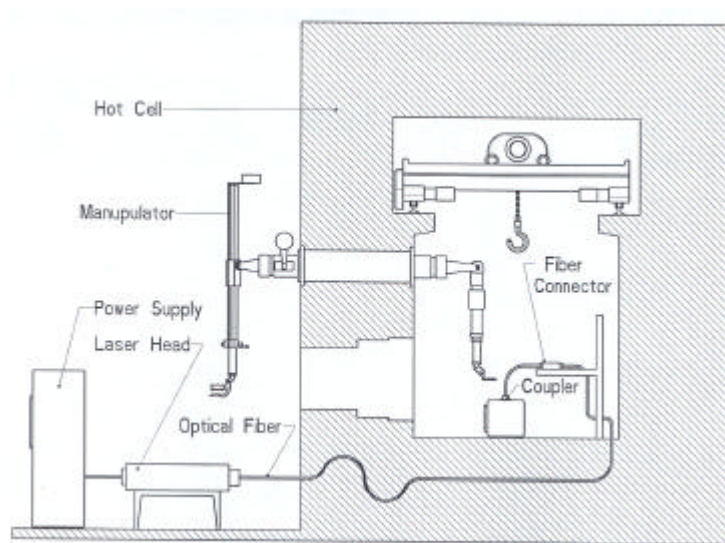


Fig. 3. Schematic illustration of optical fiber delivery system.

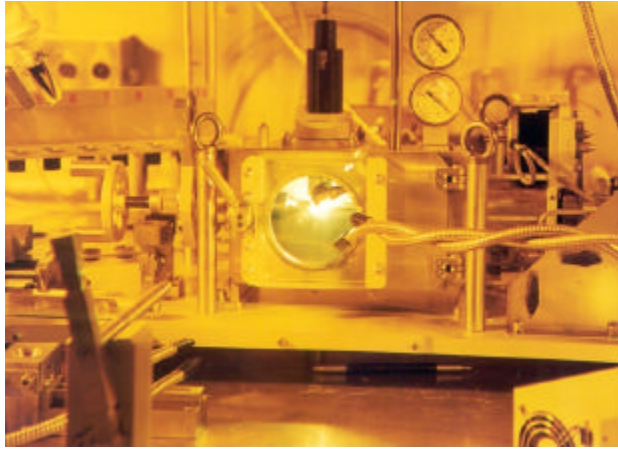


Fig. 4. Remotely operated welding chamber.

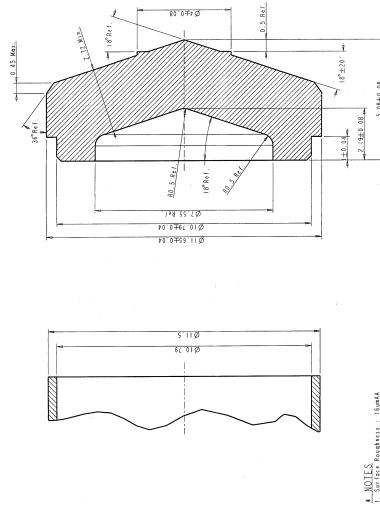


Fig. 5. Configuration of endcap joint for laser welding.

Table 1. Welding results and parameters for DUPIC endcap welding.

Specimen No.	Charging Voltage (V)	Laser Power (W)	Frequency (pps)	Pulse Width (ms)	Speed (rpm)	Bead Width (mm)	Weld Depth (mm)	RT
1	240	120	7	7	6	1.8	0.4	O.K
2	270	150	7	7	6	2.0	0.7	O.K
3	300	180	7	7	6	2.4	0.9	O.K
4	330	210	7	7	6	2.7	1.3	O.K
5	360	240	7	7	6	2.9	1.5	O.K

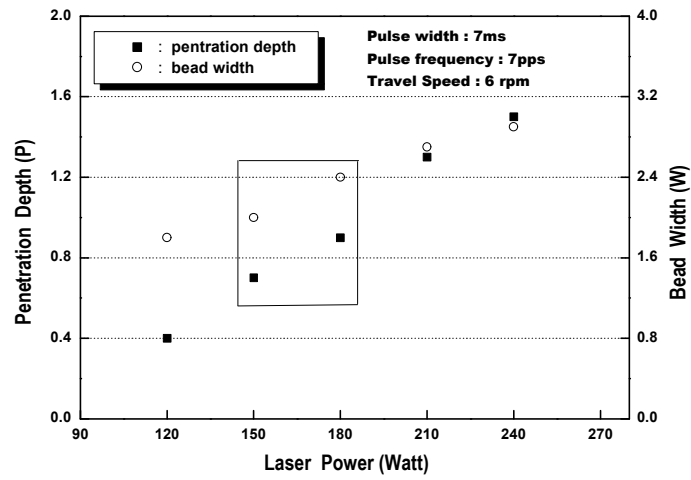


Fig. 6. Dependence of penetration depth and bead width on laser powers.

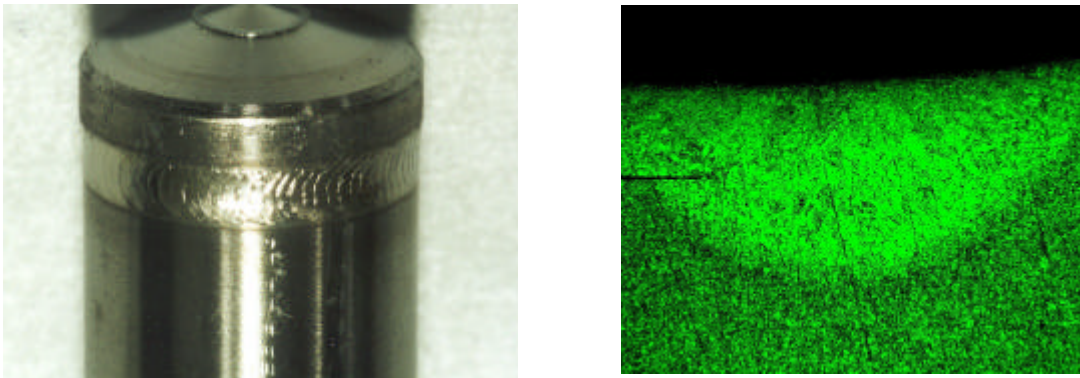


Fig. 7. Photographs of penetration depth and bead width in laser power 180W.(50x)

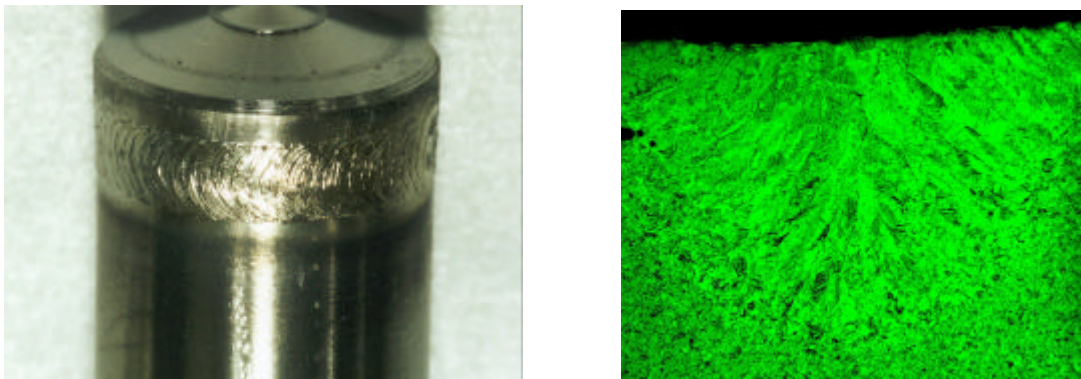


Fig. 8. Photographs of penetration depth and bead width in laser power 240W.(50x)

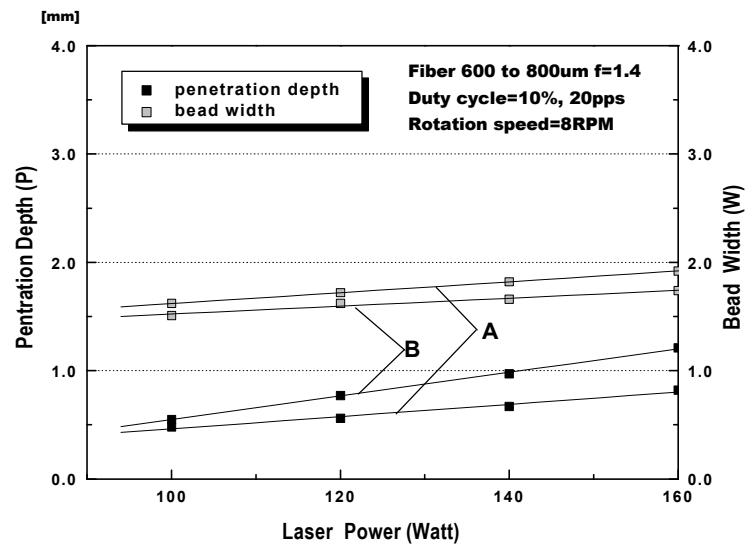


Fig. 9. Dependence of bead width and penetration depth on A & B types.

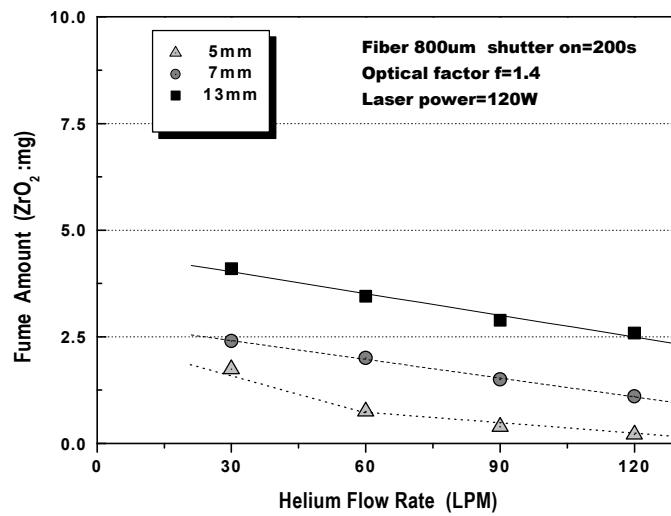


Fig. 10. Effect of the fume amounts on flow rates of helium.

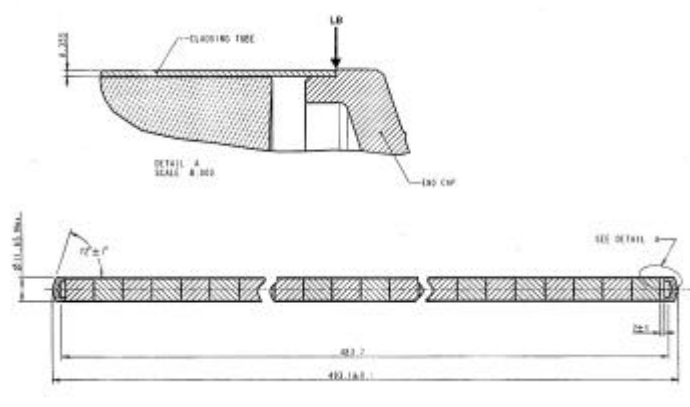
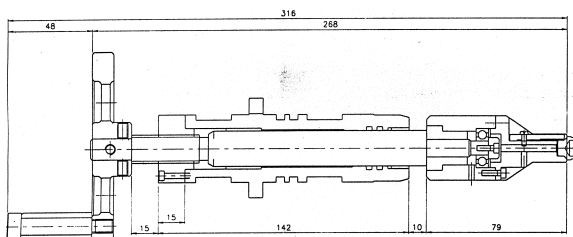


Fig. 11. Drawings of endcap and cladding tube for DUPIC element.



[Endcap insert holder]



[Before endcap insert]



[After endcap insert]

Fig. 12. Photograph of endcap holder.



[Endcap insert fixture]



[Endcap holder and insert fixture]

Fig. 13. Photograph of endcap insert fixture.

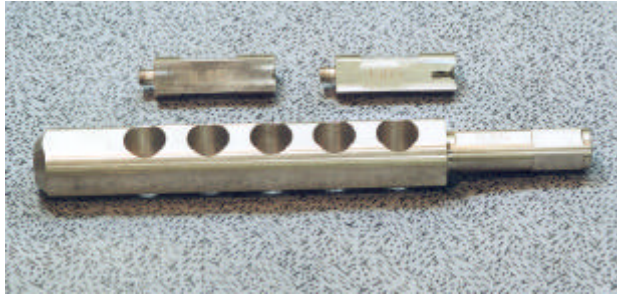


Fig. 14. Photograph of element guide bar.



Fig. 15. Photograph of adjustment guider for welding location.

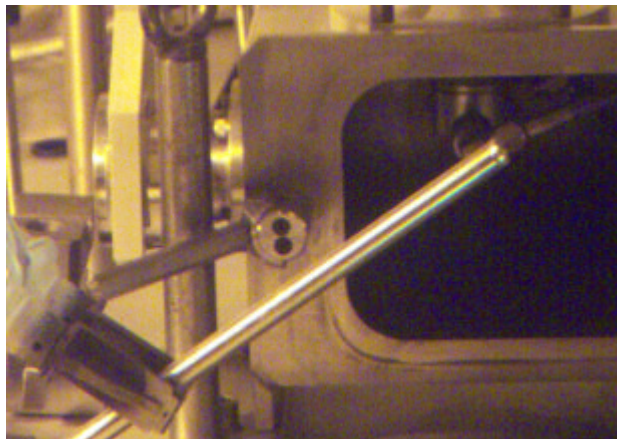


Fig. 16. Photograph of laser welded element specimen by remote operation.