

젠카이 원전 1·2호기 주요 기기의 교체 계획

요네마루 겐이치(米丸賢一)

큐슈전력(주) 원자력건설부 기계설계그룹부장

큐슈 전력 회사는 일본 군도의 남서쪽에 위치한 큐슈 지역 전체에 전력을 공급하고 있으며, 전체 생산 전력 용량 5,258MW의 25%는 우리 회사가 보유한 2기의 원자력 발전소에서 생산되고 있다.

젠카이 원전은 큐슈 지방의 남서쪽에 위치해 있으며, 1975년 첫 번째 원전이 운전을 시작한 이래 현재 4기의 원전이 운전되고 있다.

젠카이 원전에서 생산되는 전력은 3,478MW로 큐슈 지방에서 가장 큰 전력 생산량이다.

젠카이 원전은 적절한 시험과 검사를 통하여 원전 기기들의 건전성은 확인이 되어있지만, 방사선 피폭을 감소시키고 기기들의 신뢰성을 더욱 향상시키기 위해 젠카이 1·2호기의 주요 기기들(1·2호기의 원자로 용기 헤드, 2호기의 증기발생기 등)을 교체할 것을 계획하고 있

다.

본 논문에서는 교체의 배경과 교체 기기들, 그리고 2001년 3월에 계획된 젠카이 1·2호기의 계획 예방 정비(outage) 기간 동안 수행될 주요 기기들의 교체 계획에 대해 소개한다.

서론

젠카이 1·2호기는 2-loop 타입의 가압경수로형 원전으로 호기당 559MW의 전력을 생산하며, 상업 운전은 각각 1975년과 1981년에 시작되어 현재까지 만족스러운 발전소 운전이 수행되고 있다.

한편 젠카이 원전은 시스템 운용의 개선과 국내외 기술 개발 결과 및 운전 경험을 반영한 보수 작업을 통하여 설비들의 기능과 신뢰성을 향상시키기 위해 지속적으로 노력해 왔으며, 그 일환으로 방사선 피

폭을 감소시키고 기기의 신뢰성을 향상시키기 위해 2001년 3월에 계획된 젠카이 1·2호기의 계획 예방 정비 기간 동안 주기기들을 교체하기로 결정하였다.

교체 개요

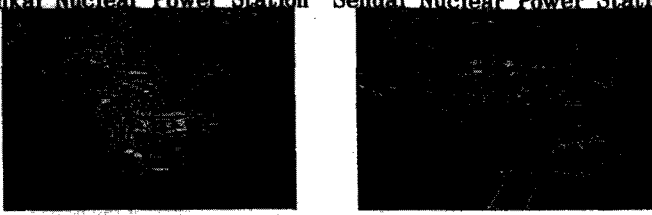
〈그림 1〉은 젠카이 1·2호기의 주기기 교체에 대한 개요와 일정이다.

1. 젠카이 1·2호기 원자로 용기 헤드 교체

해의 원전에서 발생한 원자로 용기 상부 헤드의 손상 원인은 어댑터(adapter) 재질의(Alloy 600) Stress Corrosion Crack(SCC)에 의한 것을 알려져 있으며, 손상은 비파괴 검사에 의해 발견되었다.

위의 사실에 근거하여 우리는 젠카이 1·2호기의 원자로 용기 상부

Genkai Nuclear Power Station Sendai Nuclear Power Station

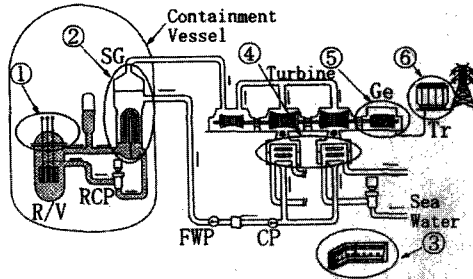


Unit	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4
Location	Saga Pref.			
Plottage	Approx. 870000m ²			
Electric Power (MW)	550	550	1180	1180
Commercial Operation	1975.10	1981.3	1994.3	1997.7
Nuclear Reactor	Type: PWR			
	Thermal Output (MW)	1650	1650	3423

Unit	Unit 1	Unit 2
Location	Kagoshima Pref.	
Plottage	Approx. 1450000m ²	
Electric Power (MW)	890	890
Commercial Operation	1984.7	1985.11
Nuclear Reactor	Type: PWR	
	Thermal Output (MW)	2660

Main Component Replacement Items

- ① Reactor Vessel Closure Heads (Unit 1/2)
- ② Steam Generators (Unit 2)
- ③ Control Board and I&C System (Unit 1/2)
- ④ Condenser Tubes (Unit 1/2)
- ⑤ Generator Stator Coil Rewinding, Rotor Replacement (Unit 1)
- ⑥ Transformer Replacement (Unit 1)

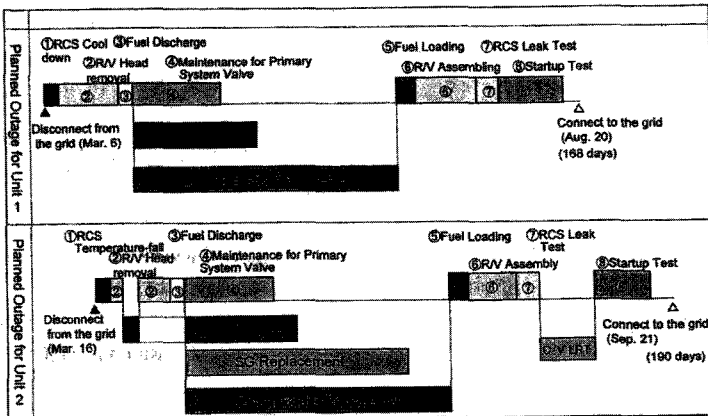


헤드에 대한 검사를 실시했으며, 그 결과 어떠한 손상도 발견되지 않았으며, 원자로 용기 상부 헤드의 건전성을 확인할 수 있었다. 그럼에도 불구하고, 우리는 방사선 피폭을 감소시키고, 기기의 신뢰성을 향상시키기 위해 원자로 용기 상부 헤드의 교체를 결정하게 되었다.

〈그림 2〉는 겐카이 1·2호기 원자로 용기 상부 헤드의 상세 설명이다.

새롭게 교체되는 원자로 용기 상부 헤드의 재원은 이전의 상부 헤드와 기본적으로 같아야 하며, 개선 계획은 상부 헤드와 어댑터 사이 용접에 의한 잔류 응력의 저감, canopy seal의 제거, part length CRDM (Control Rod Driven Mechanisms) 제거 및 SCC 방지를 위한 어댑터 재질의 개선(Alloy 690) 등과 같은 최신의 설계 및 제작 방식을 적용할 계획이다.

〈그림 3〉은 원자로 용기 상부 헤드 교체 방법이다.



〈그림 1〉 겐카이 1·2호기의 주기 교체 개요·일정

2. 겐카이 2호기의 증기발생기 교체

〈그림 4〉는 증기발생기 튜브 시트의 확관(expanded tube) 지역에서 발생한 증기발생기 튜브의 문제를 보여주고 있다.

겐카이 2호기의 튜브 손상은 13회 계획 예방 정비 기간중 수행된 비파괴 검사에서 최초로 발견되었

으며, 그 후 14회 및 15회 계획 예방 정비 기간 중에도 지속적으로 발견되었다.

증기발생기의 경우 튜브 손상 발생시 관막음(plugging)과 같은 보수 방안이 수립되어 있지만 방사선 피폭의 저감과 증기발생기의 유용성을 향상시키기 위해 증기발생기의 교체를 결정하게 되었다.

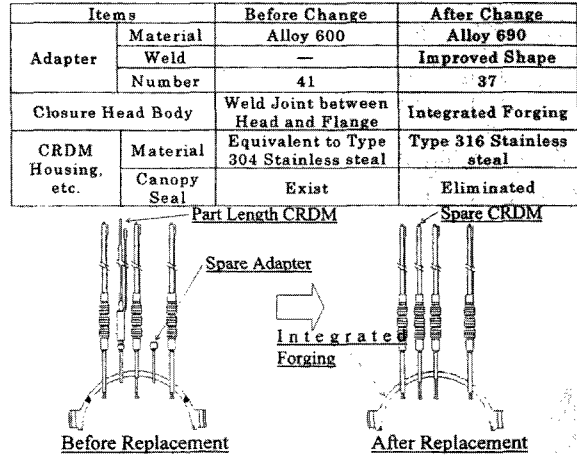
〈그림 5〉는 교체 전과 교체 후 증기발생기의 성능 비교를 보여주고 있다.

새롭게 교체되는 증기발생기의 구조는 기본적으로는 이전의 증기발생기와 동일하며, 설계에 있어서 진동 방지대 (anti-vibration bar)의 개수를 증대시키고, 부식에 강한 Alloy 690을 사용하는 등의 지금까지의 기술 습득과 최신 기술을 접목하여 적용하였다.

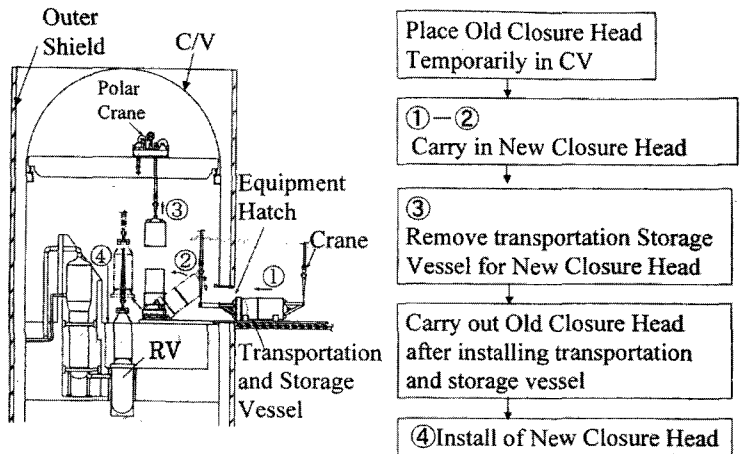
〈그림 6〉은 젠카이 2호기의 증기발생기 교체 방법을 보여주고 있다. 증기발생기는 격납 건물의 임시 출구(temporary opening)를 통하여 이동될 것이다.

〈그림 7〉에서는 증기발생기 보관 건물의 개념도를 보여주고 있다. 교체된 증기발생기와 관련 기기들은 발전소 야드(yard)에 위치한 증기발생기 보관 건물로 이동되어 보관되어질 것이다.

증기발생기 보관 건물은 젠카이 1호기의 교체된 증기발생기 보관을 위해 15회 계획 예방 정비 기간 동



〈그림 2〉 젠카이 1·2호기 원자로 용기 상부 헤드

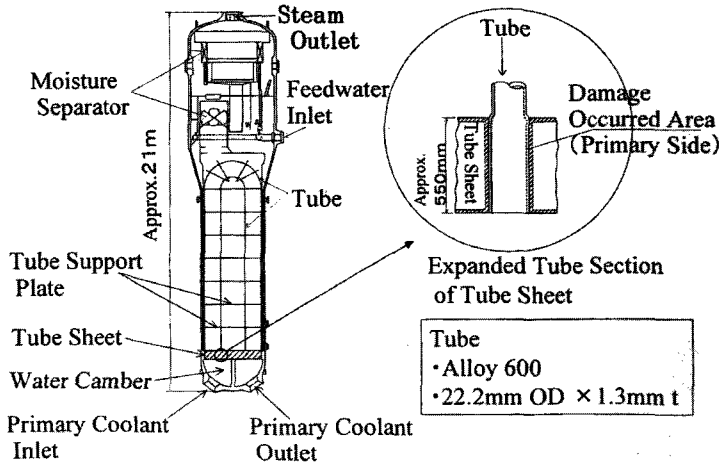


〈그림 3〉 원자로 용기 상부 헤드 교체 방법

안에 건설되었으며, 시설을 보다 확장하여 배관 및 원자로 용기 상부 헤드를 같이 보관할 예정이다.

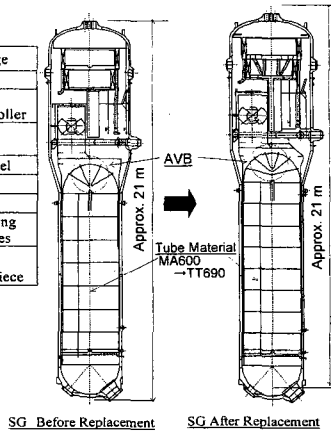
3. 제어 보드 (Control Board)의 교체

젠카이 1·2호기 제어 보드는 현재 상태에서 운전에는 문제가 없지만 발전소 운전과 감시의 신뢰성을 더욱 향상시키기 위해 최근에 제작된 젠카이 3·4호기의 제어 보드와 동일한 것으로 교체하기로 하였다.



〈그림 4〉 증기발생기 튜브 시트 확관에서 발생한 튜브의 문제

Items	Before Change	After Change
Tube Material	Alloy 600	Alloy 690
Tube Expansion Method	Roller + Rubber	Hydraulic Expansion + Roller
Anti-Vibration Bar (AVB)	Two Sets (modified)	Three Sets
Tube Support Plate	Material	Carbon Steel
	Hole Shape	Drill Hole
Number	7	8
	Small Radius U-bend	Stress Relieving Annealing: Non
Heat Transfer Area	Approx. 4,780m ² /one piece	Approx. 5,060m ² /one piece



〈그림 5〉 증기발생기의 교체 전후 비교

와 운전 성능의 개선이 가능해진다. 즉 정상운전을 담당할 주제어 보드 그룹과 기동, 정지 및 사고시운전을 담당할 보조 보드 그룹으로 구분하여 각 상황별로 효율적 운전이 되도록 하였다.

나. 보드 타입

앞은 위치에서 발전소 감시와 운전을 쉽게 하기 위한 벤치(bench) 보드 타입의 보조 보드와 많은 수의 감시 화면(CRT : Cathode Ray Tube)을 사용한 콘솔 타입(console)의 주제어 보드로 운전과 감시의 성능을 향상시키도록 하였다.

다. 감시 화면

감시의 집중과 효율을 위해 많은 감시 화면을 사용하였다.

라. 외관

회전 대칭형 외관과 기기별로 차별화된 외관으로 운전원들의 인적실수와 오동작 가능성을 감소시켰다.

훈련 센터에 있는 주제어실의 보드와 내부 장식 및 채광 등은 겐카이 1·2호기에 설치될 실제 주제어실과 동일하게 만들어졌으며, 운전원들은 이곳에서 운전 기술 습득을 위한 훈련을 받을 것이다.

4. 겐카이 1·2호기의 복수기 튜브 교체

겐카이 1·2호기 복수기 튜브는 Aluminum brass 튜브를 사용하고 있다.

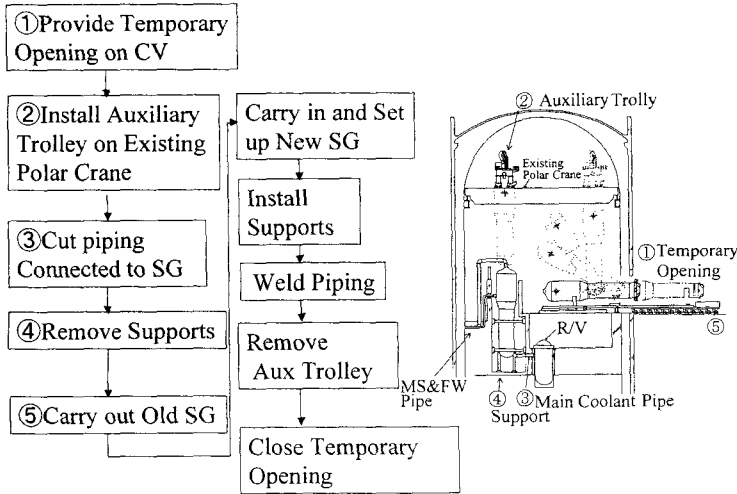
제어 보드의 교체 시기는 2001년 3월에 겐카이 1·2호기를 동시에 교체하는 것으로 계획하였다.

〈그림 8〉은 제어 보드 교체에 의한 발전소 제어 향상 효과를 보여주고 있으며, 제어 보드의 교체로

겐카이 3·4호기와 동일한 수준의 운전 효과가 발생할 것으로 기대어진다.

가. 보드 구성

기능적으로 두 그룹으로 구분한 제어 보드의 설계로 발전소의 감시



〈그림 6〉 겐카이 2호기 증기발생기 교체

〈표 1〉 복수기 튜브 누설 이력과 대처 방안

Date	Plant	Occurred Area	Causes	Countermeasures
1990. 5.31	C	Tube internal surface	Foreign objects such as shell	Plugging & tubes Replacement
1990. 6. 8	D	Ditto	ditto	ditto
1990. 8. 15	D	Ditto	ditto	ditto
1992. 12. 16	D	Ditto	ditto	ditto
1993. 2. 6	B	Ditto	ditto	ditto
1993. 8. 24	E	Ditto	ditto	ditto
1994. 6. 3	A	Ditto	ditto	ditto
1994. 12. 12	D	Ditto	ditto	ditto
1996. 2. 9	H	Ditto	ditto	ditto
1997. 3. 15	GN 1	Tube external surface	Ammonia attack.	Plugging & tubes Replacement. Changing of inspection frequency.
1997. 9. 24	K	Tube internal Surface	Foreign objects such as shell, etc.	Plugging & tubes Replacement
1997. 10. 9	D	Tube external Surface	Ammonia attack.	ditto
1998. 10. 18	E	Tube internal surface	Foreign objects such as shell, etc.	ditto
1999. 4. 2	L	ditto	Ditto	ditto
1999. 7. 18	GN 1	Tube internal surface	Foreign objects such as shell, etc.	Plugging & tubes Replacement
1999. 8. 4	G	ditto	ditto	ditto
2000. 2. 14	J	ditto	Separation of protective film	ditto
2000. 4. 19	F	ditto	Foreign objects such as shell, etc.	ditto
2000. 5. 9	H	ditto	ditto	ditto

이 튜브는 일본 원자력발전소의 상업 운전이 시작된 1982년 이전에 이미 화력발전소에서 충분한 운전 경험을 가지고 있었다.

〈표 1〉은 일본에서의 복수기 튜브 누설 이력과 대처 방안에 대해 나타내 주고 있다. 겐카이 1호기의 경우 1997과 1999년 aluminum

brass 튜브에서의 누설이 지속적으로 경험되었으며, 대처 방안인 튜브의 관막음(plugging)에 의해 복수기의 신뢰성은 확보될 수 있지만, 운전 신뢰성의 추가 향상을 위해 겐카이 1·2호기의 복수기 튜브를 titanium으로 교체하기로 결정하였다.

Titanium 튜브는 바닷물과 암모니아를 함유한 복수기 용수에 의한 부식에 강한 것으로 알려져 있으며, 최근에 원자력 발전소에 사용되어지고 있다. (큐슈 전력에서는 센다이 1호기에 이미 사용하고 있음.)

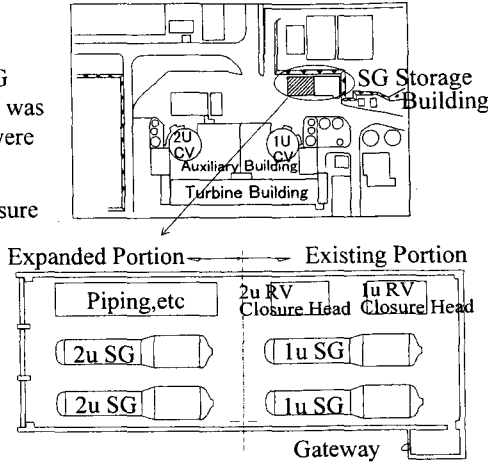
〈표 2〉는 aluminum brass 튜브와 titanium 튜브의 열 저항성에 대한 비교를 보여주고 있다. 비록 titanium 튜브의 열전도도는 aluminum brass 튜브의 1/7 정도이지만, titanium 튜브의 두께를 얇게 하고, 정기적인 튜브의 세척으로 aluminum brass 튜브와 titanium 튜브의 열전도 성능은 거의 동일한 것으로 할 수 있었다.

현재까지 일본 원전 중 복수기 튜브 번들(bundle)을 교체한 원전은 없으며, 교체 방법으로 먼저 건설때와 동일한 방식으로 튜브와 튜브 지지 플레이트 등을 현장에서 조립하는 방안에 대해 검토하였다. 하지만 이 방법은 건설 공기를 연장시키고 비용도 증가될 것이라는 사실을 알게 되었다.

이런 이유로 인하여 우리는 건설

SG Storage

- Extend the Existing SG Storage Building which was built when GN-1 SGs were replaced.
- Store the SGs, RV closure heads and old piping.



(그림 7) 증기발생기 보관 건물 개념도

(표 2) 알루미늄과 티타늄 튜브의 열저항성 비교

Items	Aluminum Brass Tube	Titanium Tube
Tube Heat Resistance	Approx. 3 %	Approx. 9 % (Tube Thickness 1/2.5 of Aluminum Brass)
Heat Resistance on Sea Water Side	Approx. 3 8 %	Approx. 3 8 %
Heat Resistance on Steam Side	Approx. 3 9 %	Approx. 3 9 %
Fouling Resistance	Approx. 2 0 %	Approx. 9 %
Total	1 0 0 %	9 5 %

공기 단축과 비용 절감을 위해 해외 원전에서 수행 경험이 있는 일괄 공사(package) 방식을 채용하기로 했다.

즉 일괄 공사 방식은 복수기 튜브 제작 및 결합과 관련된 모든 공정은 제작 공장에서 완료하고, 발전소 현

장에서는 단지 완성된 복수기 튜브를 설치하기만 하는 방식을 의미한다.

(그림 9)는 복수기 튜브 번들 교체 방법에 대해 나타내고 있다.

5. 겐카이 1호기 발전기 고장자 교체 및 코일 재감기

겐카이 1호기는 발전기 고장자의 건전성에는 이상이 없지만, 기기의 신뢰성을 향상시키기 위해 발전기 고장자의 교체와 고장자 코일 재감기 작업을 수행하기로 결정하였다. 교체 전후의 발전기 성능 비교는 (그림 10)에 나타나 있다.

6. 겐카이 1호기 변압기 교체

변압기 역시 기기의 건전성에는 이상이 없지만 기기의 신뢰성을 더욱 향상시키기 위해 2001년 계획 예방 정비 기간 동안 교체하기로 결정하였다.

기동 변압기와 unit 변압기를 동시에 교체하며, 구조적으로는 기동 변압기와 unit 변압기를 통합하는 방식을 채택하여 공간 효율성 향상 및 비용 절감의 효과가 있을 것으로 기대된다.

결론

우리는 겐카이 1·2호기 주요 기기들의 신뢰성을 향상시키기 위해 위에서 언급한 주요 기기들의 교체를 수행할 것이며, 이로 인하여 발전소는 안전하면서도 안정된 운전이 지속적으로 수행될 것으로 기대하고 있다.

Board Configuration

Divide Control Board function into two groups to improve monitoring operability.

Board Type

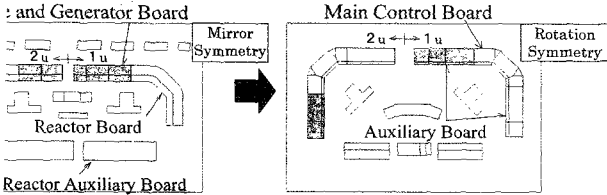
Adopt console type (Main CB) and bench board type (Aux. CB) to intensify monitoring and to improve operability.

CRT

Adopt many CRTs(2→12) to intensify monitoring.

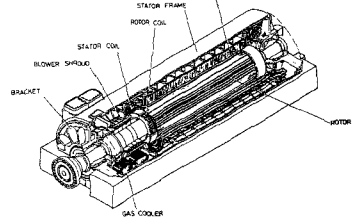
Layout

Adopt rotation symmetry to reduce the possibility of miss-operation and human errors due to the difference of equipment configuration.

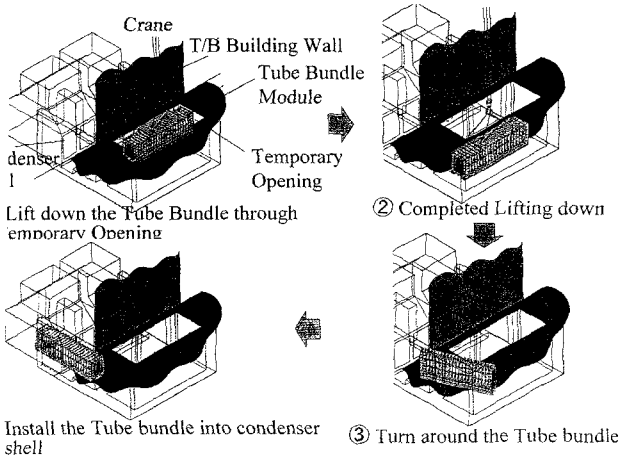


〈그림 8〉 제어 보드 교체

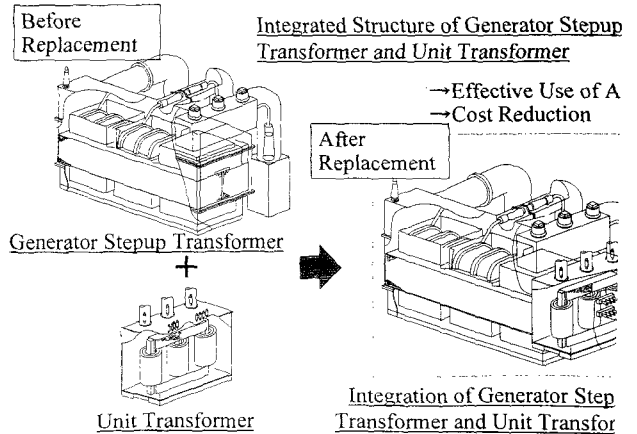
	Items	Before Change	After Change
Stator	Insulation Material	Polyester	Epoxy
	Number of Vent Tube Column	2 Columns	1 Column
	Coil End Support	Glass String	Glass Band
Rotor	Coil End Part	Jointed	No Joint
	Rotor Material	Ni, Mo, V Steel	Same as Left
	Retaining Ring Material	18 Mn - 5 Cr Steel	18 Mn - 18 Cr St



〈그림 10〉 발전기 교체 전후 비교



〈그림 9〉 복수기 튜브 번들 교체 방법



〈그림 11〉 겐카이 1호기 변압기 교체