

MCFC와 가스터빈을 조합한 Cogeneration System

* 본 자료는 일본 열병합발전센터 자료에서 발췌·번역한 것임

1. 머리말

용융탄산염형 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell, 이하 MCFC라 함)는 발전효율이 높고 환경부하가 낮은 발전시스템이다. 연료로 도시가스, 천연가스, 석탄가스화가스, 폐기물가스, 바이오매스가스 등 다양한 연료의 사용이 가능, 장래의 발전기술로 기대되고 있다. 또한 MCFC는 전해질로서 용융탄산염을 사용하므로 그의 작동원리로부터 유효한 탄산가스 분리농축 장치의 기능이 있어 지구 온난화방지에도 공헌하는 기술이다.

일본의 MCFC의 개발은 구 통상산업성 공업기술원의 MoonLight계획으로 1981년(昭和56년)에 시작되었고 그 후 NewSunShine 계획에 포함되어 2000년부터 5개년 계획으로 제3기 개발이 시작되었다. 石川島하리마重工業(주)은 1983년(昭和58년)부터 MCFC의 실용화를 향한 연구개발을 개시, 1987년 부터는 NewSunShine계획에 참여, 현재에 이르고 있다.

제3기개발에서는 MCFC의 조기 실용화를 목표로, 소형분산전원용 300kW급 가압소형발전시스템의 개발을 추진하고 있다. 또한 중규모로부터 대규모까지의 고효율발전시스템의 실현을 목표로 MCFC와 가스터빈을 조합한 시스템 실현을 위한 과제인 고압운전기술과 모듈화기술개발을 추진할 계획이다. 현재 300kW급의 가압발전시스템은 용융탄산염형 연료전지 발전시스템 기술연구조합 川越 MCFC발전시험소에서 발전시험을 실시중이다. 또한 이 개발성과를 기초로 민간에서의 현장시험을 실시하고 있다.

이와같이 MCFC는 이제까지의 개발성과를 발판으로 보급을 향한 기술개발을 발전시킬 단계에 들어갔다. 그림-1에 MCFC 개발Schedule을 표시하였다.

2. MCFC의 특징

MCFC는 다음과 같은 특징을 갖춘 차세대 발전시스템이다.

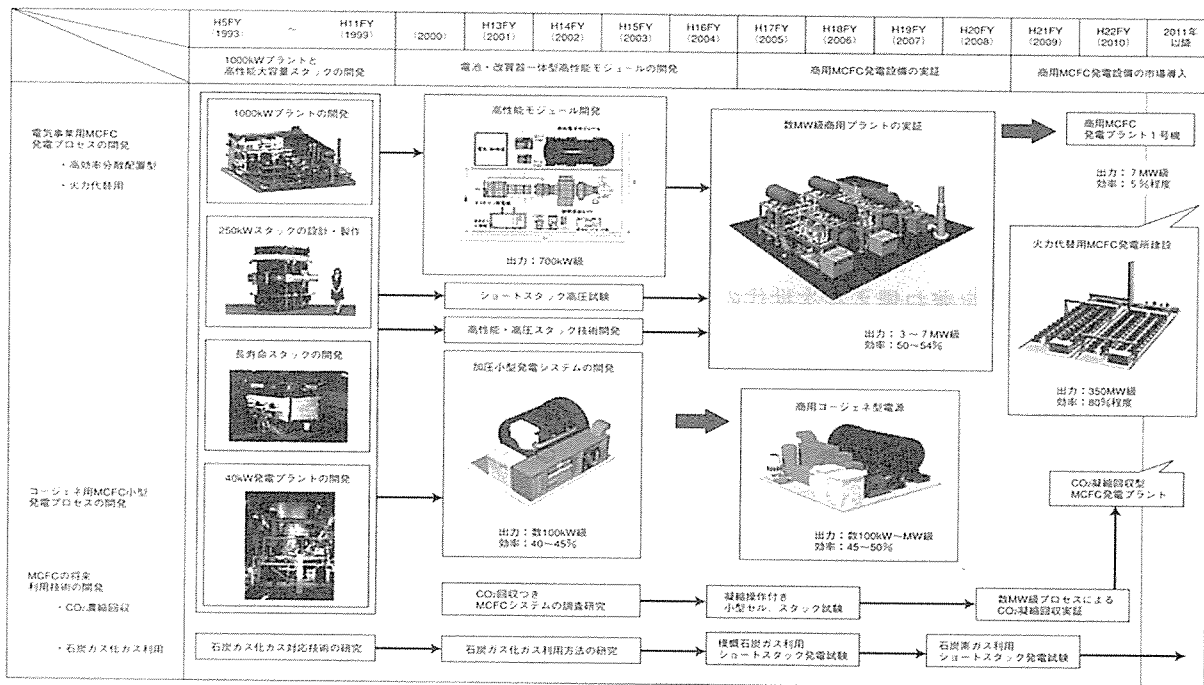


그림-1 MCFC 개발Schedule

2-1 고효율발전

MCFC 발전소는 수백kW급의 소형 Class로 45~55%(LHV), 수십만kW급의 대형 Class로 55~65%(LHV)와 넓은 발전용량 영역에서 기존의 발전설비와 비교하여 높은 발전효율이 기대된다. 또한 석탄이용에 있어서도 50~55%정도의 고효율이 기대된다. 특히 수MW로 부터 10MW 규모의 분산전원에서도 55%(LHV) 이상의 송전단효율을 얻기 위한 연료소비량의 삭감과 여기에 수반된 탄산가스발생량의 저감이 가능하여졌다.

2-2 환경성

MCFC 발전플랜트의 개질기 연소부는 최고온도가 800°C 정도로서 NOx는 거의 발생되지 않는다. SOx의 발생원인인 유황 성분은 탈류기에서 전처리 제거하므로 SOx의 발생이 거의 없다. 지구온난화의 원인이 되는 탄산가스는 발전효율이 높은 만큼 연료의 소비가 억제되어 총 배기량은 저감된다. 또한 기존의 발전설비와 비교하여 대량의 냉각수가 불필요하다. 이와같이 MCFC발전시스템은 환경부하가 작은 환경적합형 발전기술이다.

2-3 연료의 다양성

MCFC는 작동온도가 650°C로 높고 전극에 니켈금속의 다공질체를 사용하므로 일산화탄소 전용 반응기가 필요하지 않고 석탄가스화가스, 바이오매스가스, 폐기물가스 등의 다양한 연료에 대응하는 것이 가능하다. 또한 폐기물의 가스화가스나 공장 등에서 발생하는 메탄이나 수소 등의 부생가스도 연료화가 가능하여 자원의 유효 활용을 도모한다.

2-4 탄산가스의 분리·농축기능

MCFC의 운전에서는 연료전지의 연료극(燃料極) 배가스중의 탄산가스 농도가 높아지므로 탄산가스 분리 농축장치로의 이용이 기대된다. 연료극 배가스의 가스조성은 탄산가스와 수증기가 주 성분으로서 수증기를 제거하면 대부분이 탄산가스가 되어 탄산가스회수가 가능하게 된다. 또한 화력발전소 등의 탄산가스 발생원에 MCFC 발전설비를 병설하고 발생원으로 부터의 배가스 일부를 MCFC 발전설비의 산소극측에

공급함에 따라 연료극 측에서 탄산가스를 농축하는 것이 가능하게 된다. 이와같이 MCFC는 지구온난화 방지대책에 공헌하는 기술이다.

2-5 고온운전의 유리성

MCFC는 작동온도가 650°C로 높아 가스터빈을 증기터빈과 조합한 고효율발전시스템을 구축하고 고온배열을 이용하여 증기에 의한 냉난방에 활용을 도모하는 시스템 구축 등이 가능하다.

3. 가스터빈의 하이브리드 (Hybrid)화 시스템

3-1 시스템 구성

MCFC와 가스터빈의 하이브리드화 시스템 구성을 그림-2에 표시 하였다. 가스터빈은 MCFC의 배가스에서 동력을 회수하고 또한 MCFC의 반응에 필요한 산소와 발전반응시에 발생하는 열을 냉각하기 위한 압축공기를 공급하고 잉여동력으로 전력을 추출한다. MCFC의 경우 플랜트의 운전조건에서 (압력, 온도, 연료 등의 조건) 전지 단독의 발전효율은 50~55%(LHV) 정도이나 가스터빈의 동력회수에 의한 발전효율은 약 5~10 포인트 정도 상승하여 발전설비 전체의 효율향상에 기여한다.

또한 본 시스템 구성의 경우 플랜트 운전압력은 가스터빈 운전압력과 같은 압력으로 되어 일반적으로 조합하는 가스터빈 용량이 커지는 만큼 운전압력은 상승한다. 예를 들면 수 kW급의 마이크로 가스터빈이나 수 100kW 급의 가스터빈과 조합하는 경우 운전압력은 0.6MPa 이하이고 수 MW급의 가스터빈과 조

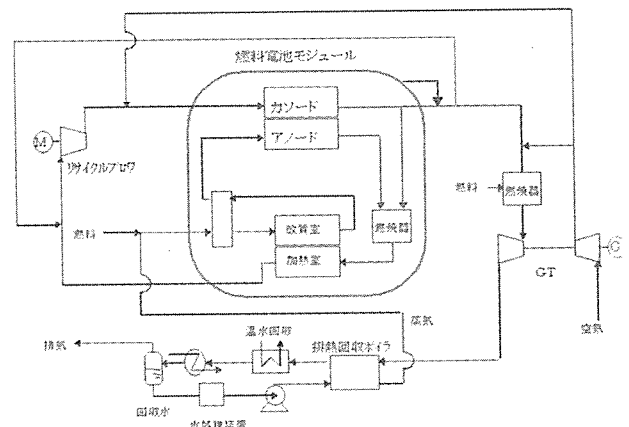


그림-2 MCFC시스템 / GT시스템

	定格負荷	部分負荷 (発電優先)	部分負荷 (熱優先)
運転圧力 (MPa)	0.18	0.05	0.18
MCFC出力 (kW)	340	140	110
GT出力 (kW)	20	0	10
発電端出力 (kW)	360	140	120
補機動力 (kW)	50	45	30
送電端出力 (kW)	310	95	90
発電端効率 (%)	55	49	29
送電端効率 (%)	47	33	21
排熱回収量 (kW)	135	75	190
総合効率 (%)	76	75	75
熱電比 (-)	0.4	0.8	2.1

표-1 연전비 가변검토결과

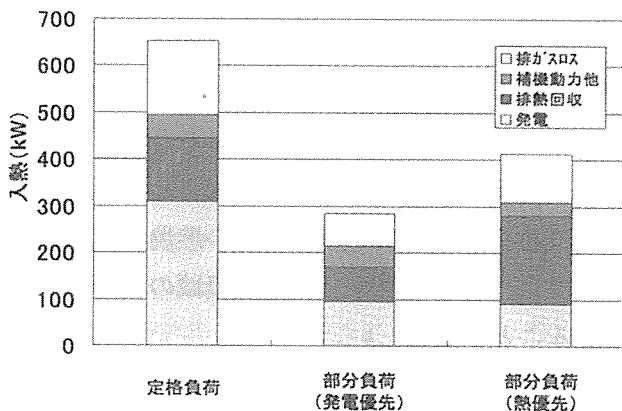


그림-3 연전비 가변검토결과

합하는 경우는 0.7MPa 로부터 1.5MPa의 범위가 된다. 운전압력의 상승은 전지 전압의 향상, 리사이클 블로워 동력의 저감 등 발전효율 향상에 기여하고 프로세스 배관, 기기Size 저감에 기여한다. 한편 연료가스압축기 동력의 증가, 개질율의 저하, 전지수명에의 영향 등의 요인으로도 된다. 실제의 설계에서는 플랜트 발전출력에 맞는 가스터빈의 용량에 의하여 운전압력이 결정되고 본 조건에서 최적의 발전효율을 얻을 수 있는 시스템을 구성한다.

연료전지와 가스터빈의 최적(最適) 하이브리드화를 위해서는 연료전지와 가스터빈의 출력비가 포인트가 된다. 발전설비는 가스터빈에의 공급연료를 최소로 하고 연료전지에의 공급연료를 최대로 하는 출력으로 발전효율이 최적치가 된다.

또한 부분부하 운전에서는 연료전지의 출력을 감소시킨 상태에서 가스터빈의 출력을 상승시키므로써 열의 비율이 증가되므로 열전비(熱電比)의 폭 넓은 변경이 가능하게 된다. 정격부하 운전시에 열전비가 0.3~0.6 정도이나 부분부하 운전시에 가스터빈 출력을

올리므로써 1.0~2.5 정도의 열전비가 가능하게 된다.

MCFC와 가스터빈시스템에 있어서의 열전비 가변(可變)은 발전출력 우선으로부터 잉여 증기량이나 잉여 온수량을 Demand로 한 열출력 우선의 제어로 전환된다. 이것은 가스터빈 출력주도의 제어로서 결과적으로 열부하를 증가시키는 것이 가능하게 된다. 이때 발전출력의 수요에 대한 부하 제어는 MCFC측에서 행하여진다. 표-1 및 그림-3은 열전비 가변계산결과를 표시한다.

3-2 하이브리드화를 위한 가스터빈 사양

하이브리드를 최적화하기 위하여는 가스터빈이 다음에 표시한 요건을 충족하는 것이 바람직 하다.

- 1) 압축공기를 연료전지에 추가(抽氣) 가능한 구조.
- 2) 연료전지 배가스를 터빈에 공급 가능한 구조.
- 3) 공연비 영역이 넓은 연소기.
- 4) 턴다운 유량의 감소.
- 5) 공기량과 배가스 유량비의 변경.

- 1) 압축공기를 연료전지에 추가(抽氣) 가능한 구조.

Plant 기동시에는 가스터빈 단독으로 기동·승온한 다음 연료전지의 승온·승압을 위하여 가스터빈의 압축공기를 일부 추가한다.

이를 위한 압축기 구조가 필요.

- 2) 연료전지 배가스를 터빈에 공급 가능한 구조.

연료전지계통의 승압후에 연료전지계통으로부터 가스터빈으로 가스를 되돌리기 위해 가스터빈 연소기와 터빈 입구간에 연료전지로부터의 배가스를 공급할 수 있는 구조가 필요.

- 3) 공연비 영역이 넓은 연소기.

연료전지계통은 열용량이 커서 승온시간이 걸리므로 가스터빈으로 부터의 추가 공기량이 많을수록 좋다. 또한 기동개시 직후에는 연료전지로 부터의 회수 가스는 대략 상온으로 되기 때문에 이런 상태에 있어서도 가스터빈을 운전할 필요가 있다. 이를 위해 가스터빈 용의 연소공기량이 적어도 연소가 가능하고 공기비 영역이 넓은 연소기로 되어있는 것이 바람직 함.

- 4) 턴다운 유량의 감소.

연료전지 계통은 승온 완료후 부하병입(負荷併入), 부하를 상승시켜 가는바 부하 상승에 수반하여 연료

전지계통으로부터의 배가스량은 증가하고 온도도 상승됨으로 가스터빈에의 공급연료를 서서히 제어하여 감소시킨다. 이때 가스터빈 연소기의 턴다운을 작게 하므로 최저 연료유량은 적을수록, 연소기 점화/소화시의 압력변동요인을 저감할 수 있다.

5) 공기량과 배가스 유량비의 변경.

연료전지와 하이브리드화한 경우 가스터빈 단독운전에 비하여 터빈 입구온도는 내려가지만 연료전지계통에 공급되는 연료나 개질용 증기로 인하여 유량은 증가한다. 이로 인하여 발전설비의 정격부하 운전 조건에서는 가스터빈 단독 정격운전조건에 비하여 터빈측 유량에 대한 압축기측 유량의 비율이 작게 된다. 따라서 연료전지와 하이브리드화를 보다 최적화하기 위하여 가스터빈의 압축기나 터빈 어느한쪽으로 부터의 유량을 변경시키는 것이 바람직 하다.

이와같이 가스터빈과 하이브리드화 하는것은 발전효율의 향상, 가압에 의한 기기·배관크기의 삭감 등에 기여하나 상기와 같은 가스터빈측의 요구사양이 포인트로 된다.

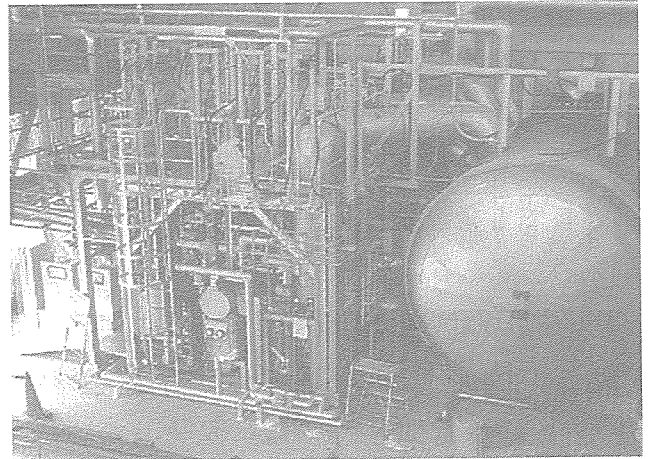


그림-4 300kW급 가압소형발전시스템

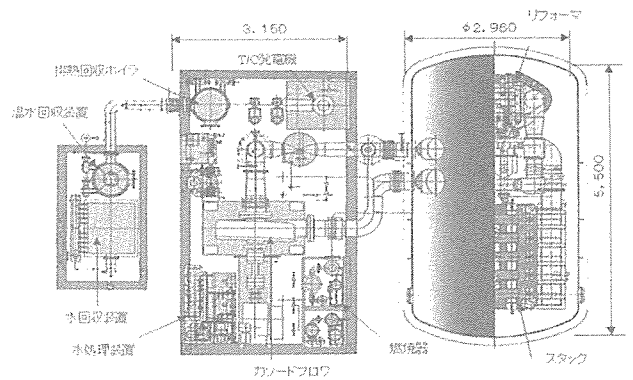


그림-5 기기배치도

3-3 300kW급 MCFC 발전설비

현재 300kW급 MCFC 발전설비 3기가 현장시험중이다. 각 설비의 시스템 구성 및 연료전지계통은 대략 동일한 사양이지만 공기공급·배열회수계통의 기기는 개발경위와 설비의 목적 등으로 상이한 사양을 사용하고 있다.

그림-2에 표시한 시스템은 연료전지 스택, 개질기, 연료예열기를 용기내에 설치하는 연료전지 모듈과 연료전지를 가스순환에 의하여 온도를 조절하는 캐소드 블로워, 공기공급·배열회수 회전기 및 배열회수 보일러, Cogeneration 운운을 검증하기 위한 온수·수 회수 열교환기, 직류/교류 인버터로 구성되어있다. 그림-4에 MCFC 연구조합의 300kW급 가압소형발전시스템을 표시하였다. 또한 그림-5에 기기배치,

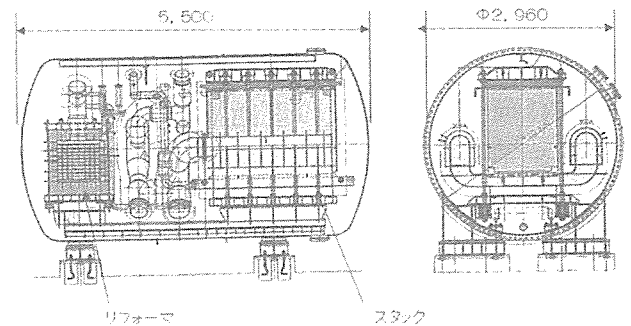


그림-6 연료전지 모듈

그림-6에 연료전지 모듈을 각각 표시하였다. 기기배치는 연료전지 스택과 개질기를 용기내에 배치하는 연료전지모듈과 캐소드블로워, 배열회수보일러 등의 주요 보조기기 및 기타 보조기기를 각각 스킵드화 하였다.

본 설비는 300kW급의 1호기로서 현장시험의 목적으로 계장기기 수도 많아 발전설비로서는 큰 사이즈

가 되었다. 현재 가동중의 2기, 3기에 관해서는 운전압력의 상승에 의한 배관·기기사이즈의 감소, 계측·제어점수의 삭감, 온수·수회수용 열교환기의 Plate Fin화, 탈탄산탑으로부터 탈탄산막의 변경 등에 의하여 보조기기 스킵프는 동일한 사이즈 내의 기기수를 증기시키는 것이 가능하여 설비전체의 사이즈를 다운시켰다. 역시 MCFC의 특징인 발전효율의 우수성을 확보 하면서 사이즈 및 단가를 동일규모의 발전설비 수준으로 하기 위해서는 가일층의 시스템구성의 간소화, 계측·제어점수의 삭감, 보조기기의 일체화,

고온배관의 삭감 등을 추진 하여야할 필요가 있다.

현재 이제까지의 설계실적을 반영, 차기 설계의 시스템사양 및 구성, 기기배치 등을 검토하고 있고 연료전지 모듈구성을 수정, 시스템구성의 간소화, 기기를 삭감하는것 등을 계획하고 있다. 표-2에 Plant 사양, 그림-7에 기기배치 조감도를 표시하였다.

3-4 수MW급 MCFC발전설비

연료전지와 조합하는 가스터빈의 출력을 크게 함에 따라 발전설비 규모가 크게 된다. 2MW급 가스터빈과의 하이브리드화의 경우 표-3의 설비사양에 표시한것과 같은 발전설비용량이 된다. 또한 가스터빈 압력상승에 수반하여 운전압력도 상승한다. 앞서서도 언급한바와 같이 운전압력 상승은 Merit/ Demerit한 점이 있는바 고압화에 의한 개질율의 저하는 연료가스중의 수소변환효율을 내리므로 연료전지에서 사용하는 수소가 감소하고 직접발전효율 저하에 영향을 미친다. 반응은 몰수가 증가하는 반응 때문에 압력이 높아지는 만큼 진행되기 어렵게 되고 한편 수증기는

燃料	都市ガス
燃料電池出力 (AC)	320kW
MGT出力	40kW
發電端出力	360kW
補機動力	30kW
送電端出力	330kW
發電端効率 (LHV)	57%
送電端効率 (LHV)	52%
運転圧力	0.32MPa
電池電圧	0.751V
燃料利用率	83%
改質率	93%

표-2 Plant계획 사양

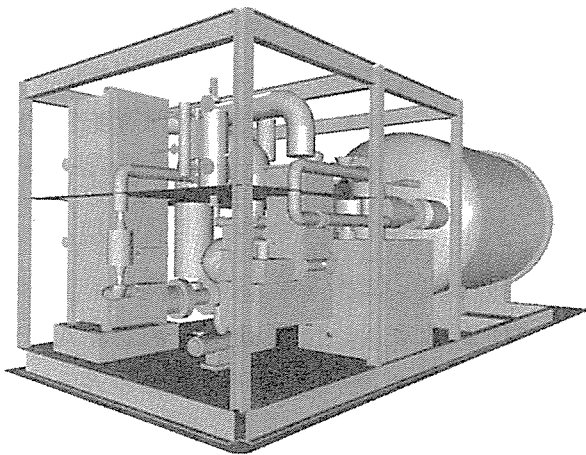


그림-7 연료전지 모듈

많을수록 수소화가 진행되는 반응이 된다.

또한 고압화에 의하여 터빈 팽창비 증가에 의한 터빈 출구온도는 저하되고 증기 포화온도는 상승되므로 증기확보가 어렵게 된다. 한편 개질용 증기는 증가시키는 만큼 개질율은 향상되므로 고압화에 의한 증기는 많을 수록 바람직하다. 이의 대책으로서 전지반응에 의하여 생성되는 수증기를 사용하여 미반응분의 메탄을 개질하는 시스템을 검토하고 있다. 본 시스템은 수증기 농도의 높은 Anode 출가가스의 일부를 별도 설치하는 개질기로 수소화하여 Anode 입구에 리사이클하여 연료로 사용하는 방법이다. 개질기는 리사이클 계통의 배관 일부에 개질촉매를 충전하는 간단한 구조로 하고 외부로부터의 열의 공급은 없고 프로세스의 현열에의하여 개질되는 시스템이다. 이 시스템을 채용함으로써 발전효율을 60% (LHV) 정도로 예상하고 있다.

4. 저 칼로리가스 연료에의 대응

가스화 가스연료 중에는 일산화탄소가 다량 함유되어 있는바 연료전지 반응에 의하여 수소는 소비되고 전극의 촉매활성화에 의하여 일산화탄소의 수소화 반응은 진행된다. 이로인하여 화석연료나 리사이클 연료의 가스화가스 등의 저 칼로리가스를 연료로하여 발전하는 것이 가능, 4,000~8,000kJ/Nm³ 정도의 연료로도 발전효율 40~50%(LHV)를 얻는것이 예상된다. 연료가스중 불순물의 영향에 관해서는 유화수소, 할로젠, 암모니아 등이 확인되어 각 불순물의 허용농도를 파악하고 있다.

금후에는 가스화가스나 바이오매스가스 등의 저 칼로리 가스의 실증운전이 계획되어 있다. 이들의 실증운전을 통하여 각 가스에 있어서 발전설비 성능, 운용성 확인을 하고 저 칼로리가스의 높은 발전효율을 갖는 발전설비로서 우위성을 확보하기 위하여 데이터축적을 실시하여나갈 예정이다.

5. 맺는말

MCFC 발전설비의 개발에 즈음하여 신에너지·산업기술종합개발기구 (NEDO) 와 용융탄산염형 연료전지발전시스템기술연구조합 (MCFC 연구조합)의 협력을 받고 있다.