

2003 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

인도네시아 마두라섬의 SMART 원자력해수담수화플랜트 건설 에비 타당성 연구

A Preliminary Feasibility Assessment of SMART Nuclear Desalination Plant Construction in Madura Island, Indonesia

황영동, 이만기, 장문희, 김시환

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구는 인도네시아의 마두라 섬에 SMART 기술을 이용하여 전기 및 물 생산을 위한 원자력해수담수화 플랜트 건설 타당성 평가가 그 목적으로 IAEA의 다 지역 기술협력 프로젝트 “마두라 섬의 원자력해수담수화 건설 경제적 타당성 평가” 과제의 일환으로 수행되고 있으며, 한국(KAERI), 인도네시아(BATAN) 및 IAEA간의 국제공동연구로 2002년 1월 착수 하였으며 2004년 완료예정이다. 본 연구의 주요 연구내용으로는 인도네시아 마두라 섬의 에너지 및 물 수급계획 분석, 플랜트 건설 후보부지에 대한 평가, 환경 및 보건 영향 평가, SMART 해수담수 플랜트에 대한 기술성 및 경제성 평가 등을 포함하고 있다. 본 논문에서는 현재까지 수행된 공동연구 결과 중 SMART 해수담수화 플랜트에 대한 기술성 및 경제성 평가 내용을 중심으로 기술하였다.

Abstract

An economic and technological feasibility study has been carried out jointly among KAERI, BATAN and IAEA for the construction of SMART nuclear power and desalination plant in Madura Island, Indonesia. This study was conducted under the framework of the Interregional Technical Co-operation Project of IAEA entitled as "A Preliminary Economic Feasibility Assessment of Nuclear Desalination in Madura Island". This joint study will be carried out for three year(Jan. 2002 ~Dec. 2004. The scope of joint study includes the analyses for the short and long-term energy and water demand and supply plan for Madura Island, evaluation of the site characteristics, environmental impacts and health aspects, technical and economic evaluation of SMART and desalination system. This paper presents the interim results of the joint study by focusing on technical and economic aspects of the nuclear desalination using SMART in Madura Island.

1. 서론

인구증가, 산업발전 등으로 인해 전 세계의 많은 지역에서 깨끗한 물 부족 문제를 겪고 있으며 이는 더욱 심각한 문제로 확장되고 있다. 이와 같은 세계적인 현안인 물 부족문제를 타개하기 위하여 IAEA는 원자력을 이용한 해수의 담수화 프로젝트를 적극적으로 추진하여 원자력 해수담수 시범플랜트 건설 프로젝트와 원자력 해수담수화 플랜트 계통설계에 대한 지역 간 기술협력 프로젝트를 추진하고 있다. IAEA의 원자력 해수담수화 관련사업에 주도적으로 참여해 온 한국원자력연구소(KAERI)는 1997년부터 산·학·연 협력으로 발전-담수생산(전기생산 : 90Mwe, 담수생산 40,000m³/day) 목적의 소형 원자로 SMART 개발을 착수하여 2002년 3월에는 기본설계를 완료하였다^[1]. 일체형원자로 SMART 설계개발에는 국내에 이미 확보된 상용경수로 기술을 최대한 사용하고 부족기술은 추가적으로 개발하여 사용하였으며, 특히 해수담수화 기술은 세계적으로 인정받고 있는 우리 고유의 상용기술이 직접적으로 접목되었다.

수천개의 섬을 가지고 있는 인도네시아는 매년 전기소요가 10% 이상 증가하고 있으며, 섬들간 기후, 수자원과 인구밀도의 차이가 매우 크며 대부분의 섬들은 전력 및 물 부족으로 매우 어려운 실정이다. 인도네시아는 이들 섬에 전기와 물을 생산·공급하기 위한 목적에 KAERI에서 개발중인 소형원자로 SMART가 가장 적합하다고 판단하여, 한국의 SMART 원자로개발에 참여를 희망해 왔었다. 인도네시아 원자력청(BATAN)은 마두라섬에 한국이 개발중인 SMART원자로를 이용한 해수담수화 플랜트 건설 타당성연구를 수행할 목적으로 IAEA와 한국에 지원을 요청하여 2001년 10월 10일 제45차 IAEA 총회 기간중 IAEA/BATAN/ KAERI 3자간 기술협력협정을 체결하였다. 본 기술협력협정을 바탕으로 하여 인도네시아와 원자력협력 기반 조성을 위한 실질적인 협력사업으로서 인도네시아 마두라섬에 현재 KAERI가 개발하고 있는 SMART 해수담수화 플랜트 건설 타당성에 대한 공동연구를 추진하게 되었다^[2,3,4].

본 연구는 KAERI/BATAN/IAEA간의 국제공동연구사업으로 3년간(2002년 1월~2004년 12월) 수행될 예정으로 인도네시아 마두라섬 지역의 에너지 및 물 공급계획을 참조하여 원자력 해수담수 플랜트에 대한 용량과 기술적인 사양을 결정하고 SMART 해수담수 플랜트 건설에 대한 기술성 및 경제적 타당성 평가 연구를 수행 중에 있다. 본 논문에서는 현재까지 수행된 공동연구 결과 중 기술성 및 경제성 평가 관련 내용을 중심으로 기술하였다.

2. 마두라섬 해수담수화 플랜트의 기본 요건

마두라섬은 인도네시아 East Jawa Province에 속해 있으며 Surabaya 해협에 의하여 분리되어 있다. 마두라섬의 면적은 부속 섬들을 포함하여 약 5,284km²로 Bangkalan, Sampang, Pamekasan 그리고 Sumenep의 4개 행정구역으로 나뉘어 있으며 약 3,131,000의 주민이 거주하고 있다. 원자력 해수담수 플랜트의 건설 후보 부지는 마두라섬의 북쪽 해안에 위치하고 있다(그림 1). 마두라섬의 전력수요는 2015년경 221~292MWe로 전망되어 100~200MWe 급의 원자력발전소가 전력 수요를 담당할 가능성이 높은 해결방안으로 고려되고 있으며, 또한 지역의 물 수요는 18,000~27,000톤/일에 이를 것으로 예상되나 급격한 공급량 확보 대신 점차적인 확보전략으로 접근할 예정이다. 마두라섬에 건설될 해수담수화 플랜트의 기본 요건은 다음과 같다^[2].

- Projected date for commercial operation	2015
- Reference date for economic evaluation	Dec. 31, 2001
- Plant capacity	2×100MWe/Unit
- Total capacity of desalination plant	4,000m ³ /day
- Seawater temperature	28-31 ℃
- Total dissolved solid (TDS)	31,000-35,000ppm
- Design Basis acceleration for safe shutdown	0.4g

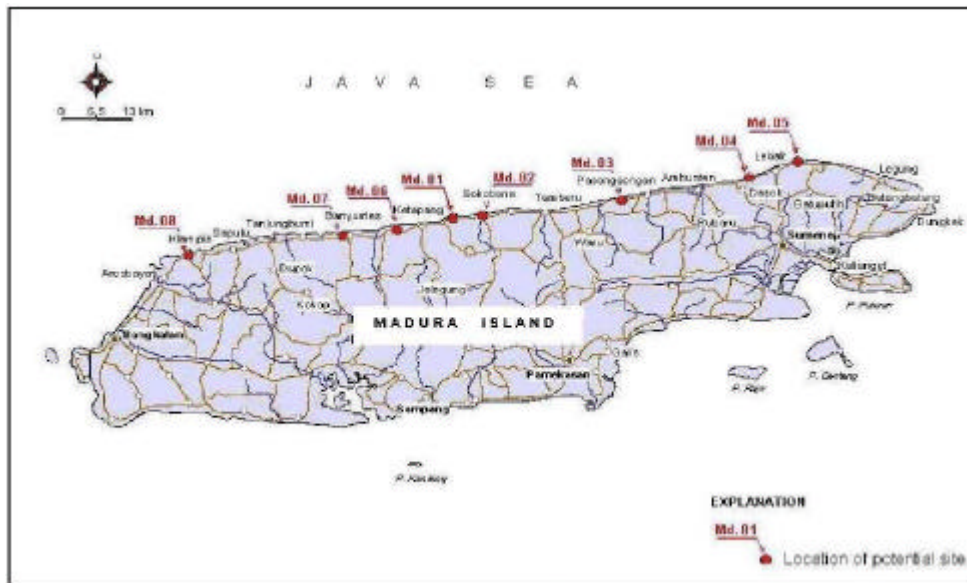


그림 1. 마두라섬 원자력 해수담수 플랜트의 건설 후보 부지

3. 마두라섬 건설 SMART 해수담수화 플랜트의 기술성 평가

한국, 인도네시아와 IAEA 전문가들이 공동으로 SMART 원자로계통의 설계특성을 분석하고, 기술성을 평가하여 SMART 원자로와 담수플랜트의 연계개념을 수립하였다. 이를 위하여 BATAN 전문가들이 한국에서 관련기술에 대한 교육 및 훈련을 받은 후 공동연구에 참여하여 SMART 해수담수 플랜트의 기술성 평가와 안전성평가 업무를 수행하였다.

본 연구에서는 원자력 해수담수 플랜트에 대한 인도네시아의 사용자 요건을 근거로 하여 SMART 해수담수화 플랜트의 기술성을 평가하였다. 인도네시아의 원자력 해수담수 플랜트에 대한 사용자요건은 크게 부지 적용 요건, 인허가 요건, 기술성 요건, 핵연료주기 및 폐기물관리 요건, 경제성 요건, 그리고 기타 요건으로 나뉘어져 있다. 기술성 요건은 원자로계통 안전성/성능/설계관련 기술요건, 담수플랜트 설계요건, 플랜트 종합 요건 등으로 구성되어 있다.

SMART를 이용한 발전-담수 플랜트는 원자로(SMART), 발전계통 및 담수계통으로 구성된다. SMART 원자로는 일반적인 가압경수로형 Loop형 원자로와는 달리 일차냉각재계통

및 주기기가 연결 배관 없이 한 개의 압력용기 내에 배치되어 일차계통 유로를 형성하는 일체형원자로(Integral Reactor)이다. 즉, 모든 주기기를 원자로 압력용기 내에 설치함으로써 기존의 Loop형 원자로가 가지는 대형 냉각재 상실사고를 원천적으로 배제하는 특성을 가지고 있다. SMART 설계에는 기본적으로 입증된 경수로 설계기술을 이용하고 안전성을 획기적으로 제고시키기 위해 고유안전성 개념 및 피동안전 개념 등의 혁신적인 안전개념을 도입하고 있다. 신기술은 개별 실험/시험과 현재 추진 중인 SMART-P 프로젝트를 통해 입증될 예정이다. 평가결과 SMART 설계는 안전정지 지진 요건 (Design Basis Acceleration for Safe Shutdown-0.4g)을 제외한(SMART 설계에는 0.3g를 적용하였으나 인도네시아 사용자 요건은 0.4g를 요구) 인도네시아 사용자 요건서의 기술성 요건을 만족하는 것으로 평가되었다^[4,5].

마두라섬의 원자력 해수담수화 플랜트는 하루 4,000m³의 담수생산을 목표로 하고 있다. SMART와 연계되는 담수화 공정은 다중증발법(MSF), 다중 효용법(MED)의 증발법과 역삼투압법(RO) 등 상업적으로 이용 가능한 모든 공정이 연계될 수 있으나 MED가 가장 적합한 것으로 평가되고 있다^[3,4]. 또한 담수생산용량은 비교적 규모가 작은 4,000m³/day으로 터빈 중간에서 일부 증기를 추출하여 담수공정에 사용하는 연계방식을 채택하였다.

열 에너지를 이용하는 원자력 해수담수에서 가장 중요한 안전현안은 원자로에서 발생한 방사성 물질에 의한 생산담수의 오염이다. 방사성 물질에 의한 오염으로부터 생산담수를 보호하기 위하여 SMART 플랜트와 해수담수 플랜트는 증기변환기(steam transformer)를 통하여 연결되며, 방사성 물질에 의한 생산담수의 오염가능성을 지속적으로 추적할 수 있는 감시계통이 담수플랜트에 설치된다. 또한 담수생산을 위해 추출되는 증기는 SMART 2기에서 생산되는 증기 총량의 2%이하로 담수계통의 연계로 인해 SMART의 안전성을 위협하는 새로운 요인이 추가되지 않는 것으로 평가되었다^[4,5].

4. 마두라섬 건설 SMART 해수담수화 플랜트의 경제성 평가

전기와 담수를 동시에 생산하는 설비에 대한 경제성은 생산설비의 규모뿐만 아니라 전기와 담수의 생산비율, 운영에 있어서 전력과 담수의 생산비율의 변화 폭, 그리고 부지 조건 등에 의하여 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 SMART 플랜트와 화석연료 발전원을 비교 대상으로 선정하고 화석연료 발전원으로는 복합화력과 석탄화력을 고려하였으며 해수담수화 플랜트의 경제성 분석을 위하여 IAEA의 DEEP (Desalination Economic Evaluation Program)을 사용하였다. DEEP 프로그램은 power credit방법을 사용하여 담수비용을 산출한다^[6,7]. SMART 플랜트의 건설단가는 한국전력기술주식회사의 분석결과를 이용하여 산출하였다^[5]. 해수담수화 플랜트의 성능에 영향을 미치는 평균 냉각수온도, 해수 TDS 와 평균 공기온도 등 기술적 입력자료는 인도네시아의 마두라 섬 자료를 이용하였으며 전력구입 가격, 석탄가격, 석유가격 및 천연가스 가격 등 경제적 입력자료는 인도네시아에서 제공한 자료를 이용하였다. 기준화폐는 US\$, 운전시기는 2015년 1월 1일, 화석연료발전소의 경제수명 기간은 30년, 원자력발전소의 경제적 수명기간은 40년을 가정하였다.

해수담수화 플랜트의 경제성 분석을 위하여 사용한 발전플랜트의 기술적 및 경제적 자료는 표 1, 담수 플랜트의 기술적 및 경제적 자료는 표 2와 같다.

대안간의 경제성 비교평가는 등가발전비용 방법과 담수 생산비용에 의한 두 가지 방법에

의하여 수행되었다. 그림 2의 다양한 대안에 대한 등가 발전 비용 산출 결과에 의하면 석탄 발전소와 연계한 RO공정(contiguous reverse osmosis)이 가장 경제적인 대안으로 나타났다(4.087 cent/kWh). 그러나, 이 방법은 동일한 담수생산량과 유사한 기본 발전설비규모를 가지고 있는 경우에만 적용가능 하므로, 석탄화력 발전은 비교 대안에서 제외되어야 한다. 이는 석탄화력발전의 설비용량 규모가 600MWe로서 이는 다른 대안에서 고려하고 있는 설비용량 규모의 거의 3배에 해당하는 규모이기 때문이다. 이러한 점을 고려한다면, SMART와 연계한 RO 공정이 가장 경제적인 대안으로 평가된다(4.167 cent/kWh).

표 1. 발전 플랜트의 기술적 및 경제적 자료

항목	단위	석탄화력	복합화력	가스터빈	SMART
설비용량	MWe	600	194*	123*	2×100
열효율	MWe	0.36	0.49	0.33	0.33
건설공기	월	48	24	24	36
건설단가	US\$/kWe	1,088	880	400	1,615
운전유지비	US\$/MWh	3.43	5.23	4.57	2.32
연료비	US\$/MWh	-	-	-	8

주1) gross output

표 2. 담수 플랜트의 기술적 및 경제적 자료

항목	단위	MED	MSF	RO
설비 규모	m ³ /d	4,000	4,000	4,000
기준 단위비용	\$/ (m ³ /d)	1,067.6	1235.6	912.5
담수플랜트 비용의 예비비 계수		0.10	0.10	0.10
담수플랜트의 사업주 비용 계수		0.05	0.05	0.05
담수플랜트의 건설공기	개월	12	12	12
관리자 평균 임금	\$/년	6,000	6,000	6,000
노동자 평균 임금	\$/년	3,600	3,600	3,600
운전유지 예비비(specific)	\$/m ³	0.03	0.03	0.03

그림 3은 담수생산비용의 산출결과로 SMART와 연계한 RO 공정이 가장 경제적인 대안으로 나타났다. 이러한 결과는 등가발전비용에 의한 산정 결과와 일치하고 있다. 증발법을 사용하는 대안 중에서는 MED 공정이 MSF 보다 경제적이며 SMART와 연계한 MED 공정이 가장 경제적인 대안으로 나타났다(1.06 \$/m³).

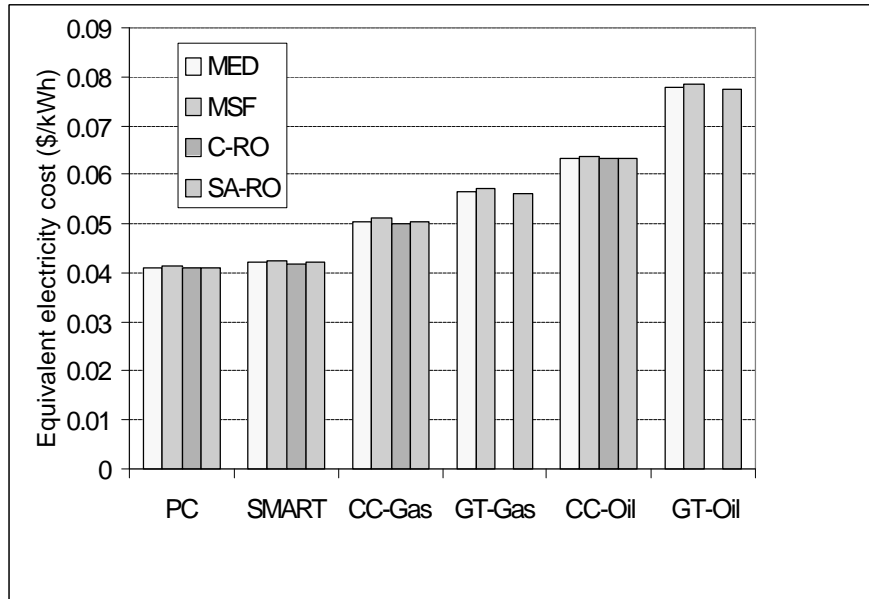


그림 2. 다양한 대안에 대한 등가발전비용

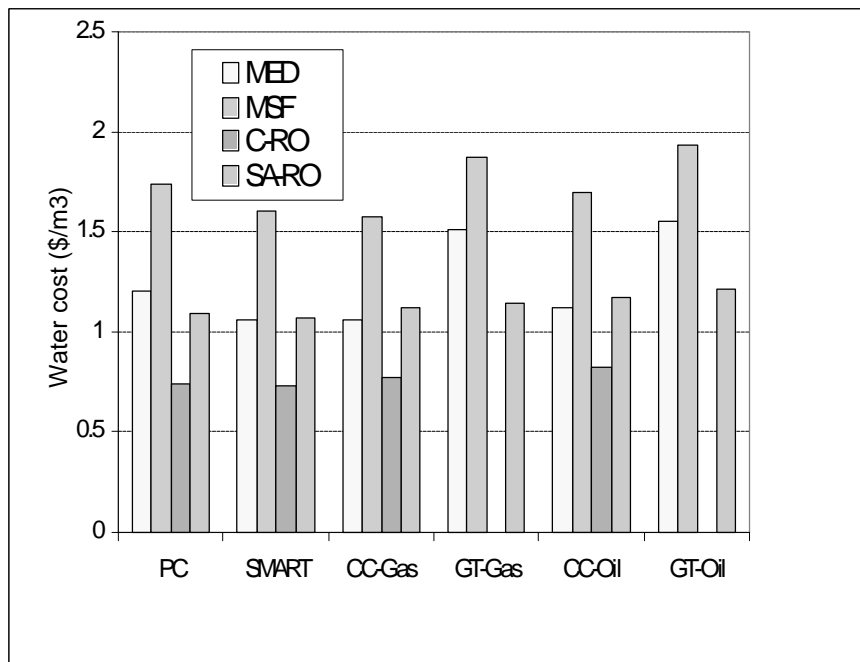


그림 3. 다양한 대안에 대한 담수생산 단가

그림 4는 발전비용의 산출결과로 SMART의 발전단가는 석탄화력발전의 발전단가와 비슷하게 나타났으며 가스터빈의 발전단가가 가장 높은 발전원으로 나타났다. 그러나 석탄화력발전의 경제적 우월성은 규모의 경제에서 비롯된 것으로 석탄화력발전의 플랜트 용량은 600MWe인 반면 SMART 플랜트의 용량은 2×100MWe이다.

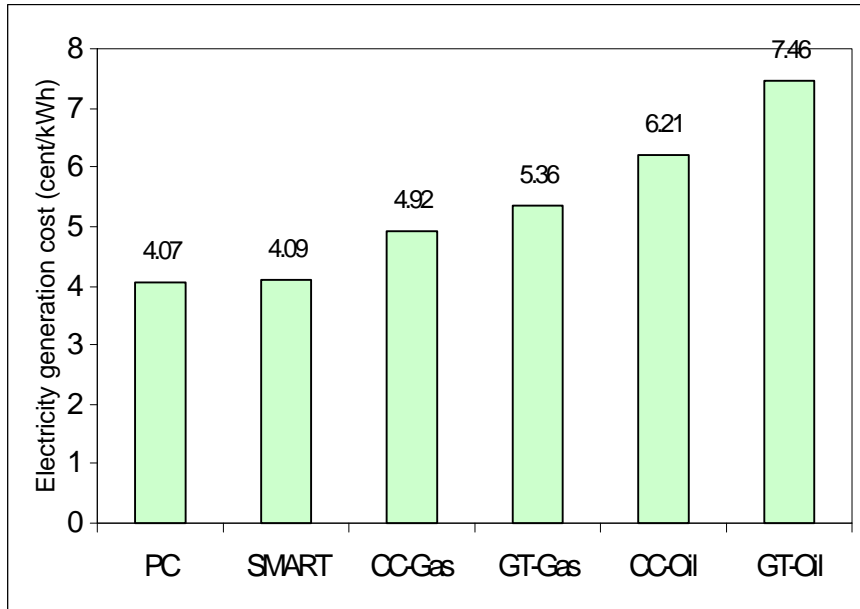


그림 4. 다양한 대안에 대한 발전단가

또한 경제성에 가장 큰 영향을 미치는 주요 변수인 할인율과 연료가격에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 표 3은 할인율과 연료가격 변동에 대한 발전단가 산출결과로 SMART를 이용한 원자력 해수담수화가 석탄화력을 비롯한 타 발전원에 충분한 경쟁력이 있는 것으로 나타났다. 석탄화력발전원의 경우 경쟁력은 주로 규모의 경제효과에 의해 뒷받침되고 있으며 할인율이 낮아지면 SMART의 경제성이 향상되며 낮은 연료가격에서는 복합화력의 경제성이 향상되는 것으로 나타났다^[5].

5. 마두라섬의 원자력해수담수 플랜트 건설계획

인도네시아에서 제공한 마두라 섬의 에너지 및 물 공급계획을 기초하여 2015년까지 SMART 2기를 건설하여 20만 KW의 전력과 일산 4천톤의 식수공급을 위한 마두라섬의 원자력 해수담수화 플랜트에 대한 건설일정을 설정하였다. 또한 SMART 2기 건설후부지 4개를 선정하여 부지특성과 환경평가를 실시하였으며, 2003년 2월초에 IAEA와 공동으로 부지선정에 대한 workshop을 개최하였다.

마두라 섬의 원자력 해수담수화 플랜트에 대한 건설일정은 예비타당성 조사 연구기간 중에 원자력 해수담수 플랜트 설계·건설과 관련된 사용자 요건 초안을 작성하고 이를 검토·조정하여 2007년까지 최종 확정하고, 동시에 2007년부터 본격적인 타당성 연구를 수행하여 2009년부터 기본설

계를, 2011년부터 상세설계에 착수하여 2012년 전반기에 건설허가(Construction Permit)를 획득하여 2015년까지 시운전을 마치고 운영허가를 획득하여 준공할 예정으로 설정하였다^[4].

표3. 할인율과 연료가격 변동에 대한 발전단가 산출결과

발전원	연료가격	할인율		
		8%	10%	12%
복합화력(가스)	2.25\$/mmbtu	0.044	0.047	0.050
	2.5\$/mmbtu	0.046	0.049	0.052
	2.75\$/mmbtu	0.049	0.052	0.055
복합화력(석유)	16\$/bbl	0.052	0.055	0.058
	20\$/bbl	0.059	0.062	0.065
	24\$/bbl	0.067	0.070	0.072
가스터빈(가스)	2.25\$/mmbtu	0.053	0.054	0.055
	2.5\$/mmbtu	0.049	0.050	0.051
	2.75\$/mmbtu	0.057	0.058	0.059
가스터빈(석유)	16\$/bbl	0.062	0.063	0.064
	20\$/bbl	0.074	0.075	0.076
	24\$/bbl	0.084	0.087	0.087
석탄화력	30\$/t	0.035	0.038	0.042
	35\$/t	0.037	0.041	0.044
	340/t	0.040	0.043	0.046
SMART(원자력)		0.036	0.041	0.046

6. 결론

본 연구는 인도네시아 마두라섬 지역의 전기 및 물 부족 문제를 해결하기 위하여 우리나라가 개발중인 소형원자로 SMART의 건설·운영에 대한 경제성과 기술적 타당성을 평가하는 KAERI/BATAN/IAEA의 국제공동연구 사업 일환으로 수행되었다. 한국과 인도네시아의 전문가들이 공동으로 인도네시아의 원자력해수담수화 요건을 기준으로 SMART 해수담수 플랜트에 대한 기술성 및 경제성을 평가하였다. 평가결과 SMART 해수담수화 플랜트는 마두라섬 원전건설 예정 후보부지에 적용이 요구되는 안전정지 지진 요건을 제외한 모든 요건을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 경제성 분석 결과 SMART 해수담수 플랜트는 발전단가와 담수생산 단가 면에 있어서 석탄화력, 복합화력과 가스터빈에 충분한 경쟁력을 갖는 것으로 평가되었다. 따라서 SMART가 인도네시아의 마두라 섬에 건설될 경우를 예상하여 정책 및 기술적인 측면에서 인도네시아측과 적극적 협력이 필요할 것으로 판단되며 가능한 범위 내에서

SMART의 우수한 경제적과 높아진 안전성을 인식시키도록 노력함으로써 우리나라의 고유 모델인 SMART 플랜트 수출이 이루어지도록 노력해야 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력 국제협력 기반조성사업 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 장문희 외 다수, "일체형원자로 (SMART) 기본설계보고서", KAERI/TR-2142/2002, March 2002, 한국원자력연구소.
2. Meeting Report, "Kick-off Meeting on Preliminary Economic Feasibility Study of Nuclear Desalination in Madura Island, Indonesia", Jakarta, Indonesia, Jan. 28-31, 2002.
3. Meeting Report, "The first Progress Review Meeting on Preliminary Economic Feasibility Study of Nuclear Desalination in Madura Island, Indonesia", Daejeon, Korea, Sept. 2-5 2002.
4. Meeting Report, "The 2nd Progress Review Meeting on Preliminary Economic Feasibility Study of Nuclear Desalination in Madura Island, Indonesia", Jakarta, Indonesia, Jan. 27-30, 2003.
5. 김시환 외 다수, "한.인도네시아, IAEA 원자력해수담수화 기술 공동연구 및 SMART 수출기반 조성" KAERI/RR-2312/2002, 2002.12, 한국원자력연구소.
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Desalination Economic Evaluation Program (DEEP), Computer User Manual Series No. 14, Vienna, 2000.
7. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Thermodynamic and Economic Evaluation of Co-production Plants for Electricity and Potable Water, IAEA-TECDOC-942, Vienna, 1997.