

原子力發電의 經濟性

— CANDU 爐, 輕水爐 (LWR) 및 石炭火力 發電所의 發電費用 比較 —

캐나다의 경우 原子力發電은 가장 공업화된 지역인 온타리오州 電力使用量의 1/3을 공급함으로써 캐나다 경제에서 그 중요성이 증대하고 있다. 이러한 원자력발전의 증대로 캐나다는 美國으로부터 석탄을 수입하지 않음으로서 1981년에 6억2천5백만달러의 外貨를 절약하였다. 온타리오 주민에게 이에 못지않게 중요한 것은 전력요금의 適正화가 하는 것인데 原子力發電費用은 石炭火力發電費用과 비교할 때 절반을 약간 상회하는 정도이다.

석탄화력발전소의 경우 運轉費用 특히 石炭燃料費用이 총발전 비용의 2/3를 점하고 있으며 또한 모든 여건으로 보아 석탄 가격은 계속 상승할 것이기 때문에 원자력 발전의 경제성은 시간이 흐를수록 증가하고 있다. 반면 원자력발전소는 建設費가 비싸기는 하지만 운전비용은 총발전비용의 1/3에 불과하며, 또한 운전비용 중 우라늄 연료비용이 차지하는 비중은 아주 작다.

이러한 사실은 최근 온타리오 하이드로 전력공사(Ontario Hydro)의 L. G. McConnell, L. W. Woodhead 및 G. R. Fanjoy가 작성한 논문에서 증명되었다. 그들의 연구목적은 첫째, 온타리오州에 所在하는 同一規模, 同一發電量의 석탄화력발전 비용과 원자력발전 비용을 자세히 비교 제시하고, 둘째, 순수한 학술적 목적에서 온타리오 하이드로사의 것과 비슷한 규모의 전형적인 미국 가압경수로(PWR)의 설계, 제작, 건설 및 운전 비용을 분석 평가하는 것이었다.

온타리오 하이드로사는 州政府의 電力公社로서 소비자에게 가장 저렴하고, 장기적으로 전력을 생산, 공급하여야 한다는 법규정을 준수함과

동시에 근로자의 안전, 공공 안전, 환경보호 및 신뢰도 유지 등 기본적 사항을 충족시키지 않으면 안된다.

온타리오州 電力需要의 전형적인 特性은 전력부하율(System Load Factor: 최고 전력수요에 대한 연평균 전력소모율)이 69%이나 실질부하는 시기에 따라 다양하다는 것이다. 공장이稼動하고 사회가 활동하는 낮에는 최고 부하에 이르는 일이 많으며 또 기후조건 때문에 기온이 낮은 겨울철에 보다 높은 부하에 이른다. 미국의 일부 지역에서와 같이 냉방장치 가동에 따른 부하 상승은 사실상 없다.

온타리오州의 이러한 電力需要를 합리적으로 충족시키기 위해서는 水力發電, 火力發電 및 原子力發電이 이상적으로 혼합되어야 한다. 그러나 長期電源計劃을 수립함에 있어서는 대부분의 대규모 수력발전 잠재력은 이미 개발되었고, 석탄은 800km(500마일) 떨어진 미국의 광산이나 또는 그 절반 거리에 상당하는 알버타(Alberta)에서부터 북미 대륙을 횡단하여 수송하여야 한다는 사실을 고려해야 한다.

이러한 여건에서 원자력 발전은 자본비와 운전, 유지, 관리비용(OMA cost)이 높고 연료비용이 저렴하기 때문에 기초부하를 충족 시키기에 가장 적합한 반면, 화력발전소는 建設費用이 싸고 운전, 유지, 관리비용(OMA cost)도 원자력발전소보다 저렴하기 때문에 최고 부하 수요를 충족시키는 수단으로 적합하다.

총단위 에너지비용(Total Unit Energy Cost)은 흔히 서로 다른 형태의 發電費用을 비교 분석하는 데 사용되는 데, 이것은 상대적인 경제

적 이점을 비교할 수 있는 단순하고, 적절한 指標가 되기 때문이다. TUEC에서 고려하여야 할 세가지 비용은

- 1) 자본의 연간 이자 및 상각비
- 2) 연간 운전, 유지, 관리비
- 3) 연료비 등이다.

CANDU型 加圧重水炉의 경우에는 네번째 비용으로 연간 중수 유지비가 포함되나 이것은 총 단위에너지비용(TUEC)의 약 5%에 해당하는 적은 비용이며, 또 발전소를 해체할 경우 그 重水는 판매 회수 될 수 있다.

온타리오 하이드로사의 연구팀은 첫번째로 Pickering NGS-A 원자력발전소(515MWNet 4基)와 495MW Net 4基인 Lambton 석탄화력발

전소를 비교하였다. 이 두 발전소는 모두 現代的 設計로 1970년대에 동시에 건설되었고 좋은 발전 성능 기록으로 全稼動되고 있다.

두번째는 최근에 건설된 두 발전소, 즉 1970년대 후반에 稼動된 Bruce NGS-A 원자력발전소(4×740MW Net)와 Nanticoke 석탄화력발전소(8×490MW Net)를 비교 분석하였다.

Pickering 원자력과 Lambton 화력의 비교에서 Pickering의 연간 순가동율은 88.1%이었으며, Lambton의 발전비용도 이와 동일한 가동율로 가정하여 계산하였다. Bruce 원자력과 Nanticoke 화력의 비교에서는 Bruce의 1981년도 순가동율 91%가 兩發電所를 비교하는 기초수치로 활용되었으며 Bruce의 發電量 一部分이 인근의

表1 Pickering NGS-A/Lambton TGS Cost Comparison - 1981

	UEC [m\$/kW.h (net)]	
	<u>Pickering NGS-A</u>	<u>Lambton TGS</u>
Interest and Depreciation	6.41	1.89
Operation, Maintenance, and Administration	4.56	1.72
Fueling	2.17	19.48
Heavy Water Upkeep	.69	-
Total Unit Energy Cost (Net)	13.83	23.09

Station Data

	<u>Pickering NGS-A</u>	<u>Lambton TGS</u>
Capacity (Maximum Continuous Rating) MWe net	4 x 515	4 x 495
In Service	1971 - 1973	1969 - 1970
Initial Capital Cost (M\$ Canadian escalated)	746.5	257.0
Specific Capital Cost (\$/kW)	362.4	129.8
Economic Lifetime (years)	30	30
Depreciation Method	Straight Line	Straight Line
Interest Rate (%)	11.45	11.45

* Pickering NGS-A and Lambton TGS Net Capacity Factor: 88.1%

表2 Bruce NGS-A/Nanticoke TGS Cost Comparison 1981

	<u>UEC [m\$/kW.h (net)]</u>	
	<u>Bruce NGS-A</u>	<u>Nanticoke TGS</u>
Interest and Depreciation	10.27	3.37
Operation, Maintenance, and Administration	3.46	1.29
Fueling	2.80	21.98
Heavy Water Upkeep	.50	-
Total Unit Energy Cost (Net)	<u>17.03</u>	<u>26.64</u>

Station Data

	<u>Bruce NGS-A</u>	<u>Nanticoke TGS</u>
Capacity (Maximum Continuous Rating) MWe net	4 x 740	8 x 490
In Service	1977 - 1979	1973 - 1978
Original Capital Cost (M\$ Canadian escalated)	1 961.1	872.9
Specific Capital Cost (\$/kW)	662.5	216.1
Economic Lifetime (years)	30	30
Depreciation Method	Straight Line	Straight Line
Interest Rate (%)	11.45	11.45

*** Bruce NGS-A and Nanticoke TGS Net Capacity Factor: 91.0%**

重水工場에 가공스팀형태로 공급되었다는 사실도 감안하였다. 이상의 두 비교를 表1과 表2에 나타내었다.

비교 분석결과로 나타난 사실은 다음과 같다.

1) 석탄발전소의 자본비용은 원자력발전소보다 훨씬 낮다.

2) 원자력발전소의 연료 비용(Pickering NGS-A의 경우 2.17m\$/kWh, Bruce NGS-A의 경우 2.8m\$/kWh)은 석탄발전소의 연료 비용(Lambton TGS의 경우 19.8m\$/kWh, Nanticoke TGS의 경우 21.98m\$/kWh)보다 훨씬 낮다.

3) 원자력발전의 경우에만 발생하는 重水費用은 총 단위에너지 비용(TUEC)의 5%에 불과하다.

4) 기초부하를 기준으로 할 때 Pickering NGS-A원자력의 1981년도 TUEC는 Lambton TGS화력의 60%였고, Bruce NGS-A 원자력의 TUEC는 Nanticoke TGS화력의 64%이었다.

총 단위 에너지 비용(TUEC)의 다양한 구성 요소가 발전소의 운전시점과 더불어 어떻게 변화하는가를 아는 것은 매우 유익하다(그림1 참조). Lambton TGS화력의 경우 석탄 가격이 발전비용 증대의 중요한 요인이 되고 있음을 알 수 있다. Pickering NGS-A원자력의 기초 부하에서의 TUEC는 1975년 가동 이래 Lambton화력에 비하여 언제나 낮았으며, Lambton의 TUEC는 석탄 가격과 수송 비용이 상승함에 따라 점차 증대되었다.

더구나 원자력발전소의 경우 앞으로 핵연료

가격이 인상되더라도 연료비용이 TUEC에서 점하는 비중이 대단히 작으므로 그것이 총 비용에 큰 영향을 미치지 못할 것이지만, 석탄화력발전소의 경우는 이와는 반대로 연료 가격이 총 발전비용에 보다 큰 영향을 주게 될 것이다.

Bruce NGS-A 원자력은 경제 수차상으로도 利點이 있지만 각종 새로운 규제조치에 따라 발생하는 많은 자본비용과 재료비 및 임금 상승에 의한 높은 비용을 상쇄하고도 남음이 있다. 이러한 사실은 TUEC의 비교(그림 2 참조)에서 알 수 있는데 Bruce 원자력발전소는 발전 초기 단계에도 Nanticoke 화력발전소보다 약간 유리하나, 시간의 흐름에 따른 원자력발전소의 비용 증가방지 특성에 따라 1981년까지의 Bruce NGS-A의 전력가격은 17.03m\$/kWh에 불과한

반면, Nanticoke TGS는 26.64m\$/kWh이었다. 미래에 있어서, 석탄화력발전소에 비하여 원자력발전의 경제적 이점은 석탄가격과 그 수송비용의 상승으로 더욱 확대될 것이다.

CANDU-PHW 원자력발전소를 다른 형태의 원자력발전소와 비교할 경우 영국의 가스냉각 흑연감속 원자로는 이미 부적합한 것으로 판명되었고, 고속증식로는 아직 상업성이 없는 것으로 증명되어 가압경수로(PWR) 또는 비등수 원자로(BWR) 형태인 輕水炉(LWR)와 비교할 수밖에 없다. 그러나 온타리오州에서는 이러한 輕水炉의 경수로를 가동하고 있지 않으므로 소요비용과 가동운전에 관한 많은 정보를 미국의 관계 사업소에 의존하여야 한다.

이 두형의 비교에서 온타리오 연구팀은 輕水

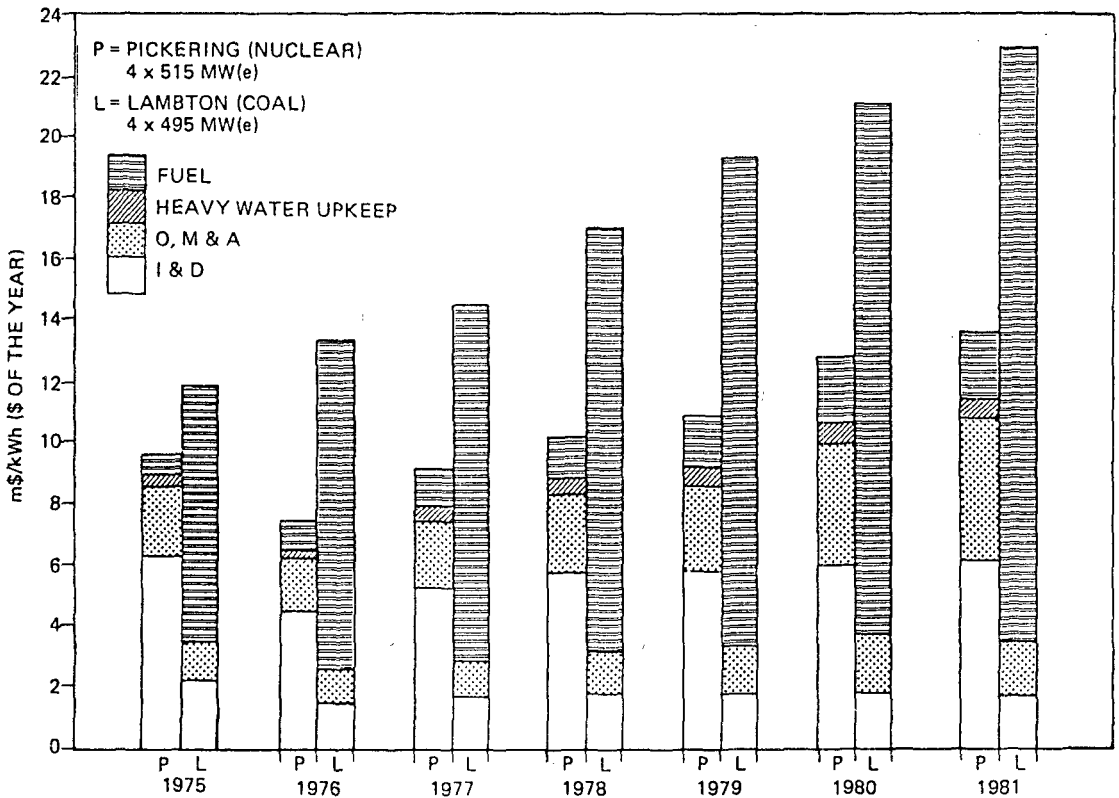


그림 1 TOTAL UNIT ENERGY COST COMPONENTS
THERMAL VERSUS NUCLEAR
(1975-1981)

爐(LWR)에서는 壓力容器가 사용되는 반면, CANDU重水爐에서는 壓力튜브가 사용되며 또한 CANDU중수로에서는 저압 감속장치를 쓰는 대신 경수로에서는 가동중지 장치 및 제어조정 장치를 高壓의 爐心内部에서 운전해야 하는 점이 있다는 것을 지적했다.

이 연구팀은 결론적으로 자본비용에 관련한 중수를 제외하고 천연우라늄이 裝填되는 CANDU형 중수로의 건설비와 거의 같은 비용으로 캐나다의 허가 기준에 맞는 동일규모의 농축우라늄이 裝填되는 경수로를 설계, 건설할 수 있다는 의견을 제시하였다.

경수로(LWR)와 CANDU형 중수로의 단위 발전용량당 운전, 유지 및 관리비용은 비슷하나 燃料費는 경수로(LWR)의 경우 燃料裝填 前에 농축되어야 하기 때문에 대단히 높다.

각 발전비용 구성요소가 총 단위에너지 비용(TUEEC)에 미치는 영향은 발전소의 가동율에 따라 달라진다. 온타리오 하이드로사의 CANDU형 발전소의 1981년까지의 누적 가동율은 79% 이었고, 가압 경수로(PWR) 및 비등수로(BWR)의 평균 누적가동율은 각각 58% 및 56%이었다. 그러나 동 연구팀은 온타리오 하이드로사 직원이 온타리오에서 설계, 건설한 가압경수로(PW

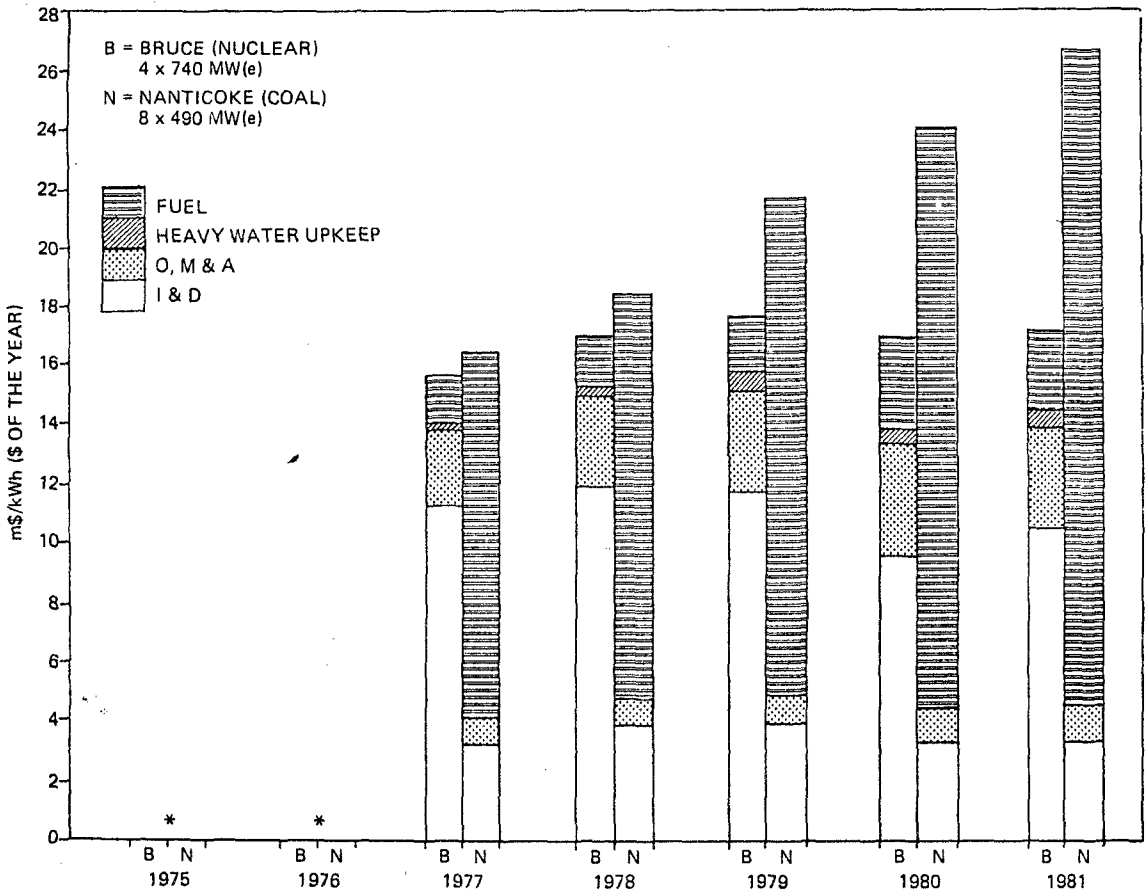


그림 2 TOTAL UNIT ENERGY COST COMPONENTS
THERMAL VS NUCLEAR
(1975-1981)

R)의 누적 가동율은 한번에 4기의 발전소를 동시에 건설하는 방법과 우수한 기술자 훈련 및 기술지원 능력에 비추어 약 68%에 이를 것으로 결론지었다.

비용 비교분석의 요약은 表3과 같으며 온타리오에서 가동될 수 있는 경수로(LWR)의 총 단위에너지 비용(TUEC)은 경수로의 전세계 평균 가동율 58%를 기준으로 할 때 CANDU형 가압중수로(PHW)의 비용보다 37% 높고, 경수로(LWR)의 가동율을 68%로 할 경우에도 CANDU형 보다 22% 높은 것으로 나타났다. 어떤 전력회사가 경수로(LWR)와 CANDU형 중수로를 함께 운영할 경우 이 두형의 원자로는 특히 우라늄의 활용과 관련하여 상호 보완작용을 함으로써 그 성능을 향상시킬 수 있다고 한다.

즉 연료로 천연 우라늄을, 감속재와 열전도체로 중수를 사용하는 CANDU형 원자로는 일정량의 채굴 우라늄으로부터 보다 많은 열에너지를 생산(表4 참조)하므로 필요한 경제적 여건이 갖추어지고 가격이 적정할 경우 같은 CANDU 가압중수로(CANDU-PHW)에 0.7% 함량의 천연우라늄 대신 약간 농축된 함량 1.2% 정도의 우라늄235를 사용하면 보다 더 많은 열에너지를 생산해낼 수 있는데 이 농축도는 경수로(LWR)로부터 제거된 사용후 핵연료의 농축상태와 유사하다. 그러나 이러한 상호 보완성을 상업적으로 실현하는 데도 경수로(LWR)의 사용후 핵연료로부터 폐기물을 제거하고, CANDU형 핵연료로 再成型하는 경제적인 가공방법이 필요하다.

表3 ONTARIO HYDRO 1981 CANDU-PHW VERSUS PWR COSTS

	CANDU-PHW	PWR	
		High NCF	Average NCF
Station Size (MWe net)	2 060	2 060	2 060
Net Capacity Factor (NCF %)	79	68	58
Interest and Depreciation UEC			
Dry Capital	5.42	6.30	7.38
Commissioning	0.19	0.22	0.26
Fuel	0.08	0.40	0.47
Heavy Water	<u>1.46</u>	-	-
Interest and Depreciation UEC	7.15	6.92	8.11
OM&A UEC	5.08	5.90	6.92
Fueling UEC	2.17	5.76	5.76
Heavy Water Upkeep UEC	<u>.77</u>	-	-
Total UEC	15.17	18.58	20.79

表4 Approximate equilibrium fuel consumption

Reactor	Fuel cycle	Fuel consumption (kg/MW-year)
CANDU-PHW	Natural uranium once through	167
	1.2 per cent enriched uranium once through	118
LWR	Enriched uranium once through	200
	Uranium recycle	170

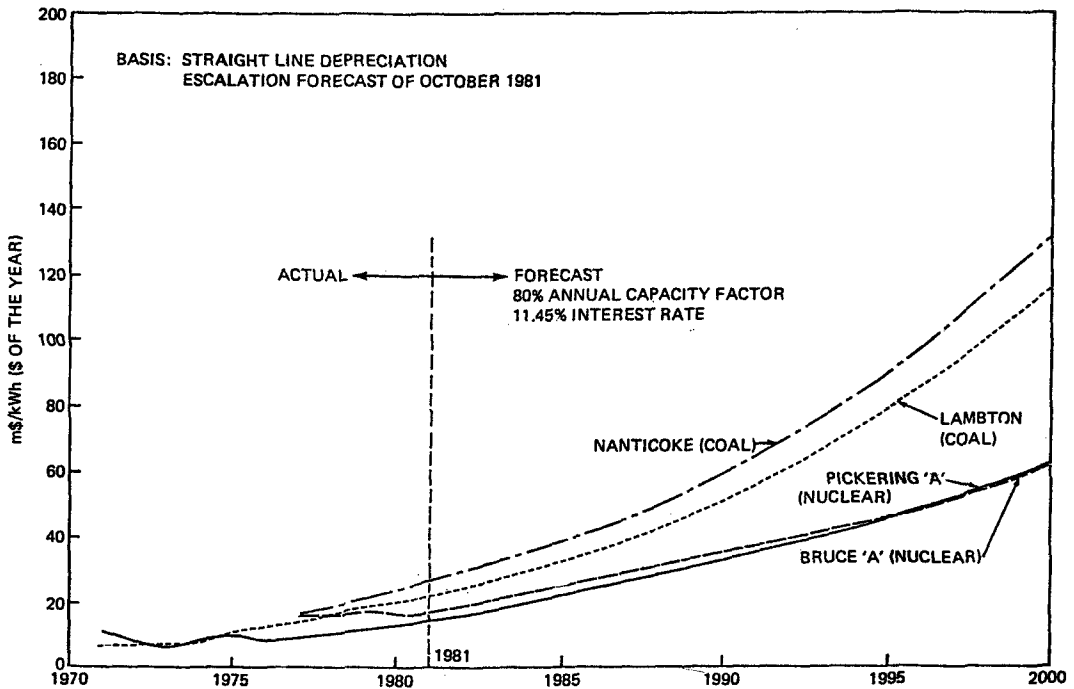


그림 3 TOTAL UNIT ENERGY COST
FOR MAJOR OPERATING NUCLEAR
AND THERMAL STATIONS

(AECL 제공)