日電中研 · 硏究報告에서

燃料高燃燒度化의 經濟性 評價

-發電코스트 12% 低下-

日本電力中央硏究所는 최근 原子力發電所에서 高燃燒度化와 長사이클運轉을 행했을 경우의 經濟性評價結果를 發表했다. 이 報告書에 의하면, 「發電코스트는 高燃燒度化와 長사이클運轉을 함께 했을 경우 가장 경제성이 높아진다」고 하였는데, 구체적으로 「6萬MWD/T·18개월 운전의 경우 종래의 3만MWD/T·9개월 운전에 비해 發電코스트가 약 12% 低下한다」고 하였다.

燃料사이클백엔드의 서비스單價 豫測値가 상승하여 플루토늄의 價値를 높혀 주리라고 기대했던 高速增殖爐의 實用化 豫相時期가 멀어짐에 따라 현재는 輕水爐에서 우라늄농축도를 높혀서 같은 重量의 연료에서 보다 많은 에너지를 발생시키는 高燃燒度化의 경제적 매력이 높아지고 있으며 또한 設備利用率을 높혀서 固定費의 절감을 목표로 하는 運轉사이클의 長期化는 고연소도화를 동시에 실시함으로서 한층 더 發電코스트의 저감효과를 높일 수가 있을 것으로 기대되고 있다.

◇ 評價의 前提

對象爐型으로는 爐物理計算이 비교적 용이한 加壓水型輕水爐(PWR)를 선택했다. 또 運轉사이클 9개월(전출력운전 9개월, 3개월 정지), 꺼내는 燃燒度 3만MWD/ton을 기준으로 하고, 燃燒度에 대해서는 3만MWD/ton에서 6만MWD/ton까지 4단계, 運轉사이클의 길이에 대해서는 12개월(전출력운전 12개월, 3개월 정지)과 18개월(전출력운전 18개월, 3개월 정지) 두가지의 長期사이클을 추가해서 양자를 조합시켜 합계 12경우를 검토했다.

110萬KW級 PWR爐心의 데이터는 미국의 Zion발전소 2호기의 데이터를 사용했다. 使用데이터는 表1～4와 같다.

◇ 燃料사이클費

計算한 12경우의 연료사이클비를 3次元空間으로 정리하면 그림1과 같다. 이 그림에서 모든 운전사이클의 길이에서 계산한 3만MWD/ton～6만MWD/ton 범위에서는 高燃燒度化할수록 연료사이클비가 저하한다는 것을 알 수 있다.

또 꺼내는 燃燒度를 일정하게 하고 長期사이클化하면 연료사이클비는 상승하나, 그 上昇率은 고연소도화함으로서 완화된다. 그림2는 고연소도화함으로서 연료사이클비 내역의 변화를 運轉사이클의 길이 9개월 경우에 대해 나타낸 것이다.

고연소도화함으로서 우라늄의 濃縮費는 상승

〈表 1〉 各 경우에 대한 交換燃料 batch数

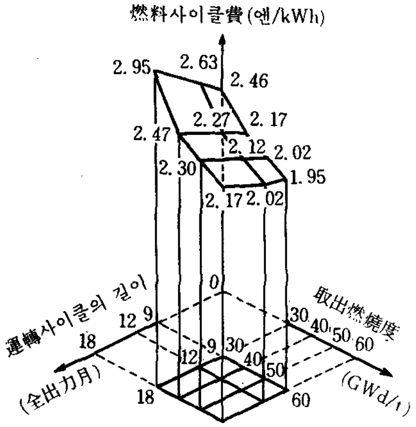
取出燃燒度 \ 運轉사이클의길이	9個月全出力運轉3個月停止	12個月全出力運轉3個月停止	18個月全出力運轉3個月停止
30,000MWd/t	3	2.25	1.5
40,000MWd/t	4	3	2
50,000MWd/t	5	3.75	2.5
60,000MWd/t	6	4.5	3

〈表 2〉 平衡사이클 交換裝塡燃料의 우라늄 濃縮度

(單位：重量%)

取出燃燒度 \ 運轉사이클의길이	9個月全出力運轉3個月停止	12個月全出力運轉3個月停止	18個月全出力運轉3個月停止
30,000MWd/t	3.00(*)	3.28	3.80
40,000MWd/t	3.57	3.78	4.21
50,000MWd/t	4.13	4.40	4.90
60,000MWd/t	4.73	4.98	5.44

(*) 基準點으로 設定



〈그림 1〉 高燃燒度化 및 長期사이클化에 의한 燃料사이클費 變化패턴 (再處理하는 경우)

하나, 천연우라늄의 精鑛費는 거의 변하지 않으며 연료사이클비의 저감을 가져오는 것은 燃料加工費와 백엔드서비스비의 큰 저하임을 알 수 있다.

꺼내는 연소도를 상승시키기 위해서는 不燃毒物(burnable poison)의 추가와 보다 엄격한 품질관리가 필요하며 燃料加工單價가 연소도에 비례해서 상승한다고 하더라도 연료사이클비는 저하한다.

〈表 3〉 燃料서비스의 리드타임과 랙타임

(單位：年)

Front End의 리드타임(燃料의原子爐裝塡時點에서)	天然우라늄精鑛		2
	우라늄濃縮		1.5
	燃料成型加工		1
Back End의 랙타임(燃料의 原子爐取出時點에서)	再處理하는경우	使用後核燃料輸送및 再處理	3
	使用後核燃料를處分하는경우	使用後核燃料貯藏開始	5
		使用後核燃料處分	35

〈表 4〉 燃料사이클서비스單價의 設定

天然우라늄精鑛	9,000엔 / lbU_3O_8
우라늄濃縮	34,000엔 / SWU
燃料成型加工	87,000엔 / kg-U
使用後核燃料輸送	30,000엔 / kg-HM
使用後核燃料再處理	160,000엔 / kg-HM
使用後核燃料貯藏	70,000엔 / kg-HM
使用後核燃料處分	100,000엔 / kg-HM

고연소도화는 리드타임, 랙타임을 길게 하므로 金利分(연료사이클비에서의 운전자본비)의 효과도 크다.

表5는 운전사이클의 길이 9개월 경우에 대해 *直接費*와 金利分을 나누어서 내역을 표시한 것인데, 이 표에 의해 우라늄농축비의 상승은 주로 金利分의 상승이라는 것, 백엔드서비스費의 저하에는 金利分의 효과도 크다는 것을 알 수 있다.

◇ 發電코스트

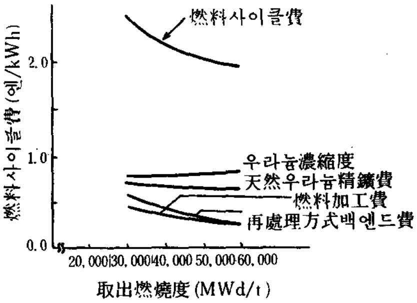
計算한 12경우의 發電코스트를 3차원공간으로 정리하면 그림3과 같다. 運轉사이클의 長期化에 의한 고정비의 저감효과는 커서 연료사이클비의 增加分을 상회하고 있으며, 어떤 燃燒度레벨에서도 長期사이클化에 의한 發電코스트는 저하하고 있다. 그리고 長期사이클化에 의한 發電코스트의 저하폭은 고연소도화할 수록 커지고 있다.

〈表 5〉 高燃燒度化에 의한 燃料사이클費 內譯의 變化

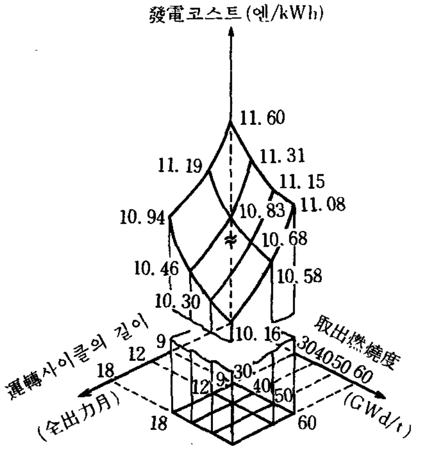
運轉사이클의 길이 : 9個月全出力運轉(10,000MWd/t), 3個月停止 (單位 : 엔/kWh)

取出燃燒度	30,000MWd/t			50,000MWd/t			60,000MWd/t		
費用項目	直接費	金 利	合 計	直接費	金 利	合 計	直接費	金 利	合 計
天然우라늄精鑛費	0.533	0.165	0.698	0.449	0.186	0.635	0.431	0.203	0.634
우라늄濃縮度	0.609	0.158	0.767	0.580	0.21	0.790	0.581	0.241	0.822
燃料加工費	0.362	0.077	0.439	0.217	0.067	0.284	0.181	0.065	0.246
再處理方式 백엔드費	0.790	-0.231	0.559	0.474	-0.163	0.311	0.395	-0.146	0.249
合 計	2.29	0.17	2.46	1.72	0.30	2.02	1.59	0.36	1.95

〈그림 2〉 燃燒度에 의한 燃料사이클費의 各成分의 變化패턴



〈그림 3〉 高燃燒度化 및 長期사이클化에 의한 發電코스트 變化패턴



확실히 高燃燒度化와 長期사이클化를 결합시켜서 실시하는 것이 경제적으로 유리하며 꺼내는 연소도를 6만MWD/ton, 운전사이클을 18개월 전출력, 3개월 정지로 함으로서 基準의 3만 MWD/ton, 9개월 사이클의 경우보다 發電코스트가 약 1.4엔 低下하고 있다.

◇ 計算結果에서의 留意點

이상과 같이 모델計算에 의해 高燃燒度化 및 長期사이클化의 경제적 이점이 定量的으로 평가되었다. 다만, 여기서 사용한 모델은 簡略化한 것으로서 계산결과의 평가에 있어서는 모델의 簡略化 및 데이터의 설정에서 오는 制約에 대해서 유의할 필요가 있다.

燃料變換計劃設定에 대해서는 剩餘反應度制御를 만족시키기 위한 burnable poison이 고려되고 있지 않다는점 등에 의해 고연소도화, 장기사이클화를 달성하기 위해서 필요한 교환연료의 우라늄농축도가 낮게 평가되어 있을 가능성도 있다. 이것은 高燃燒度化, 長期사이클運轉化의 이점을 약간 과대하게 평가하게 한다. 또한 경제성평가모델에서는 再處理에서 회수되는 플루토늄이나 減損우라늄의 가치가 무시되고 있다. 이들 回收燃料는 賣却 또는 리사이클에 의해 價値가 생겨 燃料費를 저감시키게 된다.

이 비용저감량을 크레디트라고 하는데 電力生産當 크레디트가 고연소도화함으로서 무시되면 고연소도화 경제성의 과대평가를 가져 온다. 다만 回收燃料의 크레디트는 우라늄에 대해서 사이클비의 5% 정도로 예상되며, 플루토늄에 대해서는 현재의 조건에서는 想定이 어려우나 영향이 적다고 생각되며 또한 사용한 데이터에도 불확실성이 많다.

우라늄농축단위는 앞으로 設定値보다 저하할 것으로 생각되며 현재 상업화 되어있지 않는 백엔드서비스의 단가에 대해서는 불확실성이 크므로 이들 코스트에 대해서는 항상 최신의 것으

로 평가를 개정해나갈 필요가 있다.

또 燃料사이클의 運轉資本費計算을 위한 金利設定値(8%)에 대해서도 파라미터를 변화시켜서 결과를 조사할 필요가 있다. 그러나 이상과 같은 限界와 유의점이 있다고 하더라도 얻어진 결과를 크게 변화시킬 만한 要因은 없으며, 高燃燒度 및 長期사이클化에 경제적 利點이 존재한다는 것은 확실하다.

蘇聯의 熱供給爐 開發狀況

— 二重容器로 安全性向上 —

소련은 광대한 국토를 갖고 있으나, 그 대부분이 寒冷地에 위치하고 있어서 燃料에서 차지하는 暖房의 비율이 30%에 달한다고 한다. 이로 인해 소련은 原子力에너지에 대해서 단순히 發電 뿐만 아니라 熱供給에도 목표를 맞추어서 적극적인 開發을 추진하고 있으며, 세계 최초의 熱供給爐인 고리키爐가 내년에 運開 豫定이다. 다음은 소련의 熱供給爐와 그 安全性의 概要이다.

■ 暖房用需要 30% ■

소련에서의 燃料中 發電에 사용되고 있는 것은 약25%인데 비하여 暖房 등에 사용되고 있는 것은 30%에 달한다. 이로 인해, 化石燃料대신 原子力에너지를 暖房에 사용하면 국민의 에너지균형을 크게 개선할 수가 있다.

熱需要에 대해서는 앞으로 20~25년 동안에 100萬KW爐 500基가 필요하게 될 需要가 있는데, 1基로 70만톤의 化石燃料를 절약할 수 있다. 이와 같은 여건때문에 소련에서는 原子力에너지를 열공급에 이용하기 위한 조건이 갖추어져 있다.

소련에서는 종래부터 난방을 中央暖房으로 하고 있어서 이 분야에 대한 풍부한 경험을 갖고 있으며 熱負荷의 集中化가 진척되어 있는 외에 原子力發電所의 건설경험도 많이 갖고 있다.

구체적인 原子力의 熱에너지利用에 대해서는 熱併給爐(ATETS)와 熱供給專用爐(AST) 두가지 형이 사용되고 있다. 이중 熱專用供給爐는 주로 소련 유럽지역의 中央暖房에 이용하는 것이 가장 유효하다는 결론이 얻어지고 있다. 熱供給爐는 500~1,500G칼로리/時의 熱負荷로 化石燃料와 경제적으로 경합할 수 있다. 100만KW의 AST는 化石보일러에 비해 충분히 코스트를 낮출 수 있다고 한다.

■ 높은 安全性을 確保 ■

熱供給爐에 대해서는 구체적인 設計에 착수하기 전에 도시근접입지를 염두에 두고 안전성 검토를 하였다. 그 결과 일반 원자력발전소에 필요한 安全基準 外에 다음과 같은 安全要求事項이 정리되었다.

1) 原子爐容器의 密閉破壞時 연료요소의 용해를 막는 대책을 강구.

2) 비행기의 추락, 가까운 곳에서의 폭발 등 외부작용 고려.

3) 使用後核燃料 및 방사성폐기물의 저장기간 제한.