

전원별 환경영향 평가를 위한 수명주기분석 적용 방안 연구

정 환삼, 윤 성원, 김 승수
한국원자력연구소

How to Apply the LCA to Environmental burden Assessment on Electricity Generation System

Chung, Whan-Sam, Yun, Sung-Won, Kim, Seong-Soo
Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI)

요 약

발전원별 환경영향 분석의 목적이 기존에 수행되고 있었던 연료원이나 발전원별 연소특성 혹은 환경보호시설의 기술특성 분석과 같은 미시 분석시각 뿐만이 아니라 발전원별 환경영향 분석에 있어 거시적 의사결정 변수의 구축도 중요하다면 이제부터라도 분석시각을 기존의 연료별 연소특성 분석에서 수명주기분석으로 확장할 필요가 있다.

본 연구는 전력의 환경영향 정도의 평가에 있어 수명주기분석을 적용하기 위해 수명주기분석 방법들을 조사하고, 그중 적용에 있어 현실적인 제약을 극복하기 위한 방안으로 선진국에서 수행되고 있는 단순화 수명주기분석법 중 산업연관 분석방법의 적용 방안을 제안하고 사례분석을 통해 그 유용성을 소개한다.

1. 수명주기분석¹⁾ 배경

1) Life Cycle Assessment를 전수명주기 혹은 전과정평가라고도 하며 분석범위도 제품, 재무, 환경, 보건, 외부효과 등 다양하지만 본고에서는 환경영향에 국한하고 용어도 수명주기분석으로 사용한다.

수명주기 평가는 경제협력개발기구(OECD) 무역환경 전문가 합동회의(Joint Session of Trade and Environment Experts) 등을 중심으로 활발히 논의되고 있는 PPMs(Process & Production Methods; 공정 및 제품 생산 방식)규제를 위한 평가기법으로 주목받고 있으며 OECD는 이미 1991년에 권고안 C(90) 164를 통해 회원국들에게 원료부터 폐기까지 제품의 수명주기를 고려한 종합적인 오염 예방 정책 시행을 권고한 바 있다.

일본은 미국과 유럽 선진국들이 국제기구를 중심으로 추진하고 있는 이러한 무역과 환경의 연계 움직임에 대응하기 위하여 1990년부터 통산성, 과학기술청, 환경청의 지원으로 수명주기 평가 기법을 국내에 보급·정착시키기 위한 연구개발 사업을 활발히 추진중이다. 특히 일본 전력중앙연구소에서는 20년간 축적된 에너지분석 연구 경험을 바탕으로 수명주기 평가 수행에 필요한 에너지부문의 기본 데이터를 제공하고 있으며 기후변화협약에 대응하기 위한 발전 플랜트의 수명주기 에너지 및 CO₂분석 등을 수행하고 있다(5,7,10).

II. 수명주기분석의 수행 단계

수명주기분석은 일반적으로 분석 목적의 정의와 범위의 설정(Goal Definition & Scope), 목록분석(Inventory Analysis), 영향평가(Impact Assessment), 그리고 개선평가(Improvement Assessment) 등 네 단계로 진행되나, 최근 ISO/TC 207에서 수명주기분석에 대한 표준화를 추진하는 제5분과위원회(SC5)에서는 이 가운데 개선평가 단계를 (그림 1)에서 보는 바와 같이 해석단계(Interpretation)로 수정하는 구조를 제시한다²⁾.

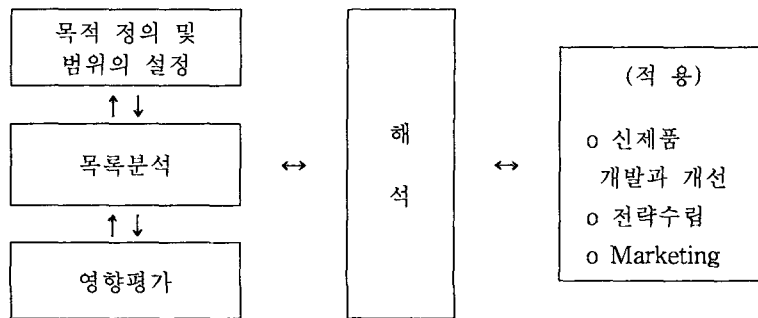
각 구성요소는 그 자체로도 존재가치가 있으나, 이들이 상호 연계되는 경우 수명주기분석으로 간주된다. 이들 각 요소들을 소개하면 다음과 같다.

- ① 목표 정의 및 범위의 설정 : 수명주기분석을 실시하려는 목표나 평가결과의 활용목적을 명확히 하는 단계이다. 수명주기분석은 사용목적에 따라 수집하는 자료의 내용이나 분석방법, 결과들이 달라지기 때문에, 먼저 평가결과의 사용목적을 명확히 하여야 한다.

2) ISO 14040 : Environment Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework, ISO, 1997

② 목록분석 : 분석하고자 하는 시스템을 대상으로 수명주기에 대한 물질의 흐름과 환경부하를 계산하기 위해서 시스템에 투입되고 산출되는 물질의 종류와 량을 정량화 하는 일련의 과정으로 다음과 같은 단계로 진행된다.

- o 흐름도의 작성
- o 자료의 수집
- o 환경부하 및 목록분석 결과 산출



(그림 1) 수명주기분석의 구조

③ 환경영향 평가 : 영향평가는 목록분석 단계에서 규명된 에너지 및 자원의 소모와 배출물이 환경에 미치는 잠재적 영향을 기술적, 정량적으로 혹은 경우에 따라서는 정성적으로 파악하고 평가하는 과정이다. 일반적으로 다음과 같은 단계로 이루어진다.

- o 분류(classification)
- o 특성화 (characterization)
- o 가치평가(valuation)

④ 결과해석 : 수명주기분석의 목적에 대한 해석은 평가결과와 비교하여 신뢰성과 유용성을 검토한다. 이러한 해석단계는 일반적으로 가장 중요한 투입물과 산출물의 잠재적 영향의 규명, 평가, 결론, 건의, 보고라는 다섯 단계로 이루어진다.

III. 수명주기분석 방법

수명주기분석을 통한 환경영향을 분석하기 위해서는 정성분석에서부터 정량분

석에 이르기까지 다양한 기법이 사용될 수 있다. 각 기법의 주요 특성, 장·단점 그리고 적용사례에 대해 간략히 소개하면 다음과 같다(9).

1. 정성적 분석

이 방법은 제품이나 제조공정의 환경영향 평가시 수치자료를 사용하지 않는다. 이 방법에서는 환경영향이나 영향 잠재력의 평가에서 도식적 수단이나 '예·아니오'와 같은 이진법 척도만을 사용한다. 일반적으로 이 방법은 적용하기 쉽고, 제품의 수명주기에 걸친 환경영향에 관한 정보를 대중들에게 전달하기 용이하고, 그리고 입력자료의 구성 부담이 적다는 장점이 있다. 이에 비해 계량화된 결과를 출력하지 못해 상세한 과학적 비교가 필요할 때 응용하기 어렵다는 단점이 있기도 하다.

이 방법을 이용한 Graedel 등(1995)의 사례에서는 제품의 수명주기에 해당하는 원재료의 추출, 제조, 포장, 수송, 제품사용 등의 단계와 제조, 환경, 독성·위험노출 수준 혹은 사회·정치성과 같이 영향을 미치는 관련 요인들을 행렬(Primary Matrix)체계로 나타내었다. 환경행렬에서는 재료의 선택, 에너지 사용, 고체잔류물, 액체누출, 기체배출 등과 같은 인자들이 취급되었다. 행렬의 각 원소들은 환경영향의 비교치들과 평가의 확실성이 정성적 기호나 음영수준 등으로 표기되었다.

다른 사례는 직접적이고 사용하기 용이한 체크리스트를 이용하는 방법이다. 이 방법을 활용할 때, 수명주기분석 응답자는 조사대상 제품이나 공정에 대해 미리 만들어진 질문에 대해 단순히 대답만 하면 된다. 그리고 수행자는 응답결과들을 취합하여 개별 단위들이 환경에 영향을 미치는가를 알아낸다. 이 방법은 공정의 환경영향 여부를 알아내기에는 용이한 방법이나 어느 정도 영향을 미치는지를 평가하기에는 부적절하다.

2. 정량적 분석

수명주기분석 수행에 있어 정량분석법은 제품이나 공정의 수명주기에 걸쳐 환경에 직접·간접으로 미치는 영향의 분석결과를 수치자료로 계량화하여 나타낸다. 정량분석의 장점은 일정분석을 통해 인지된 환경영향을 보다 과학적으로 계량적으로 확실하게 나타내기 때문에 결과의 활용이 용이하다는 것이다. 이에 비해 단점으로는 많은 양의 자료가 필요할 뿐 아니라 분석과정과 결과의 해석을 바르게

하기 위해서는 높은 수준의 전문성이 요구된다는 것이다. 정량분석의 종류는 다음과 같다.

가. 목록 평가법

이러한 부류의 평가에는 환경영향 정도는 오염물의 배출량에 정비례한다는 가정이 내포되어 있다. 이 방법에서는 오염이 환경에 초래하는 결과를 직접 평가하지는 않으나, 환경에 배출되는 오염원의 조사는 매우 상세히 수행한다. 이 때문에 이 방법은 여러 대안을 오염원의 배출량으로 비교하고자 할 때 유용하게 사용된다. 예를 들어 기술 A가 기술 B에 비해 지구온난화 물질인 CO₂를 세 배 정도 더 배출한다고 할 때, 이 방법은 각 기술에서 배출되는 오염이 지구온난화에 미치는 영향분석이나 수리 모형을 이용한 계량화의 과정을 거치지 않고 지구온난화의 입장에서 기술 B가 환경적으로 더 우수하다고 평가한다. 이 방법의 또 다른 특징은 기술에서 발생하는 오염원 배출이 환경이나 독성영향의 경계에 대한 분석 없이 오염원의 배출수준만 비교한다는 것이다. 이 방법은 동일한 효율을 제공하는 기술간에는 환경부담이 적은 기술이 바람직한 것으로 보고 '적으면 좋다'는 기준이 적용된다.

나. 영향기반 목록 평가법

이 방법은 단순 목록평가법과 마찬가지로 오염원의 분류와 계량에 초점을 두고 있으나, 분석과정은 오염원 배출의 잠재적 영향을 가중치의 형태로 계량화하는 한 단계의 과정을 더 갖는다. 예를 들어, 분석하고자 하는 특정 화학물질의 배출을 지구온난화의 기준에서 다른 물질과 비교한 가중치를 부여하여 평가를 한다. 가령 물질 X가 다른 물질 Y에 비해 두 배의 지구온난화 영향을 일으키는 화학물질이라고 할 때, 두 물질이 같은 양만큼 배출되는 시스템에서 물질 X는 물질 Y에 비해 두 배의 배출이 이루어지고 있는 것으로 배출치를 가중한다. 이러한 물질을 사용해 생산된 제품 A와 B의 환경영향 비교는 이와 같이 원료물질의 환경영향 가중 배출치를 반영해 평가한다. 이 방법은 특정 배출물이 지구온난화에 미치는 영향을 직접 평가하지는 않으나, 대신 배출물의 성질과 크기로 영향 평가를 대신한다.

이 방법을 사용한 예는 미국의 Carnegie Mellon 대학에서 인체 보건에 미치는 영향을 기준으로 독성물질 방출 목록의 가중 배출치를 평가하였고, Tennessee 대학(UOT)에서도 독성물질의 인체와 환경영향을 기준으로 독성배출 목록을 작성한 바 있다.

이와 유사한 방법이지만 다른 기법을 사용하는 "위험 순위(Hazard Ranking)법"은 제품이나 공정 혹은 활동에 따라 위험의 등급을 부여하는 방법이다. 위험치는 특별한 오염원에 대해 독성, 발암성, 환경 독성 등을 기준으로 하여 낮음, 중간, 높음과 같이 나타낸다. "위험행렬"은 특정 화학물질이나 오염원들의 인체 보건이나 환경위험과 독성이나 유사한 자료에 기초한 잠재 영향과의 관계를 나타낸다. 이 관계는 상세한 노출 평가를 실시하지 않고, 위험을 평가하는 데 사용된다. 화학물질 배출량과 함께 독성정보는 특정 수명주기 단계의 특정 화학물질에 대한 종합평가에 사용될 수 있다.

또 다른 예로는 임계체적기법(critical volume method)을 들 수 있다. 이 기법은 보통 단위시간당 질량으로 표시하는 환경배출을 단위체적당 질량으로 표시하는 환경기준으로 나누어 임계체적을 구한다. 예를 들어 모든 대기 오염원들에 관한 임계체적은 화학물질 X와 Y에 대해 각기 더해진다. 이는 화학물질들의 환경영향을 비교하는 기준을 만들기 위해 사용된다.

다. 환경 영향력 평가법

미국의 SETAC(The Society for Environmental Toxicology and Chemistry)과 환경보호국(EPA ; Environmental Protection Agency)은 기본적으로 다음과 같은 네 단계를 갖는 수명주기분석 방법을 제안하였다.

- ① 범위설정(scoping),
- ② 목록평가(inventory assessment),
- ③ 영향평가(impact assessment), 그리고
- ④ 개선방안 분석(improvement analysis)

지금까지 수행된 수명주기분석은 목록평가 단계까지의 수행에 머물러 있었으나, 이에 비해 SETAC의 방법은 보다 포괄적이고 기존의 수송, 폐기, 효과 모형, 보건위험평가 등과 같은 수법들을 통합하고 있다. 따라서 이 방법을 적용하기 위해서는 매우 많은 자료와 분석의 전문성을 필요하며, 따라서 엄청난 시간과 비용이 요구된다. 비록 SETAC 방법이 매우 포괄적이기는 하지만, 이 방법도 궁극적으로는 환경에 미치는 영향을 분석하는 수준에 머물고 있으며 더 나아가 영향을 화폐단위로 평가하지는 않는다.

라. 환경지표 측정법

정량분석의 네 번째 방법은 SETAC 방법에서 제시한 상세 평가를 수행하지는 않으나, 고유한 영향의 크기를 반영하는 수치지표를 개발하는 것이다. 이 방법은 스웨덴의 SERI(Swedish Environmental Research Institute)가 볼보사의 환경분석을 위해 개발한 환경우위시스템(Environmental Priority System)에 적용하였다. 이 방법은 인간이 사용하고자 하는 제품의 생산에 따르는 총괄환경부하를 수치로 표시하는 환경부하지수의 계산을 포함한다. 이 지수는 환경에 배출된 일정 물질의 중요성을 나타낸 것이다. 환경부하지수는 개별 제품에 대해 각기 평가되고, 여기서 구한 값들이 비교된다. 예를 들어 동일 부품의 생산에 사용된 여러 제조방법들의 환경부하를 각각 환경부하단위(ELU; Environmental Load Unit)로 나타내고, 마지막으로 이들을 값들을 비교하면서 그 차이의 유의성을 검토한다.

또 다른 사례는 AT&T에 의해 수행된 약식 수명주기분석을 들 수 있다. 이 방법에서는 제작전, 제작, 제품 포장 및 운송, 제품사용, 그리고 재사용의 다섯 단계로 구분한 수명주기와 재료선택, 에너지 필요량, 고체잔류물, 액체잔류물, 그리고 기체배출의 다섯 단계 환경문제로 구성된 행렬을 사용하였다. 여기에는 제품, 공정 혹은 설비에 대해 점수의 점수가 매겨지는 데 각 원소의 값은 가장 많은 환경영향을 미치는 경우 '0'에서부터 가장 적은 영향을 미치는 '4'에 이르기까지 다섯 단계의 점수로 평가한다. 이 경우 전체 원소의 개수가 25개이기 때문에 환경영향이 가장 적은 경우로 모두가 평가될 경우 100으로 평가된다. 결과적으로 제품과 공정들은 이와 같이 수치로 나타난 점수에 따라 평가받는다.

마. 산업연관 모형

제품의 생산활동에 미치는 환경영향을 제대로 조사하여 평가한다는 것은 어려운 일이다. 이러한 어려움으로 인해 경계 혹은 삭제 분석 방법들이 선택되고 있다. 예를 들어 제품 A를 생산하기 위해 기계류가 사용되는 경우, 기계류는 철광석에서 생산한 철로 만들어진다는 과정에 유의한다. 즉 기계류를 만드는 데는 철, 철광석, 에너지가 필요한 것이다. 또한 각 과정에는 수송단계가 필요하다. 이와 마찬가지로 한 제품을 생산하기 위해서는 여러 단계의 투입물들이 사용되어야만 한다. 그러면 어떻게 이들 투입물들에 대한 직·간접의 환경영향을 추정할 것인가?

이 질문에 대해 산업연관 모형들은 생산과정들간의 상호연관성들을 포착한다. 산업연관표는 복잡한 경제의 상호관계를 나타내고 있다. 예를 들어 Lave 등(1995)은 다섯 가지 제품의 환경영향을 분석하기 위해 519개의 부문으로 나뉘어

진 산업연관표를 이용하였다. 이 모형은 다섯 제품의 생산이 초래하는 경제에서의 직접/간접 경제적 산출물의 변화를 추정하는 데 사용되었다. 환경배출은 추정된 산출의 변화에 따른 독성 배출물들과 전기 사용의 평균치들을 적용하여 계산하였다. 그 이유는 전형적인 오염원들의 평균배출에 대한 상세한 자료를 사용할 수 없었기 때문이었으며, 따라서 독성 배출과 전기의 사용에 관한 당시의 분석은 제한적으로 수행되었다.

IV. 국내 전력산업에의 적용 방안

지구온난화에 영향을 미치는 온실효과 가스 배출을 저감해야하는 세계적 규범 하에서 전력분야에서는 오염원의 배출 저감기술 개발에 노력해야 한다. 이러한 노력에 못지 않게 중요한 것은 배출원인과 양을 정확히 측정할 수 있는 능력의 배양이라 할 수 있다.

1. 이상과 현실

제품의 수명주기에 걸쳐 환경영향을 분석한다는 것은 원칙이며 바람직한 일인긴 하지만 현실적으로 시간, 예산, 분석능력, 기초데이터 구축 여부 등 여러 가지의 제약조건이 따르는 것이 사실이다. 위와 같은 현실적 제약을 타개하기 위해 미국에서는 SETAC에 의해 1994년 4월에 단순화 수명주기분석의 연구모임이 결성되었고, 다음해 7월 EPA의 지원 하에 단순화 수명주기분석에 대한 회의도 개최된 바 있다. 이와 같이 문제점들을 우회하기 위해 일부 회사나 사용자들은 주어진 분석목적과 시간에 맞추기 위해 정통적인 수명주기분석의 방법들을 수정하여 사용하거나 여러 분야 기존의 자료를 이용하려는 단순화 방법들을 도모하고 있다.

2. 단순화 방법

단순화 방법은 연구를 가장 관심 있는 부분에 집중시키며, 정성적인 자료를 비롯하여 쉽게 획득이 가능한 자료의 사용을 통하여 목록단계에서 연구의 경계를 축소시키는 것이 대부분으로 현재 실무자들이 사용하고 있는 접근법들에 대한 유형과 장·단점들을 비교해 보면 다음과 같다(표 1).

(표-1) 경계축소 유형 및 장·단점

경계축소 유형	경계축소 방법	장 점	단 점
수명주기 단계의 부분적 축소	<ul style="list-style-type: none"> ○ 원료, 생산, 사용, 폐기단계에서 일부분 축소 - 원료 단계 - 사용, 폐기 단계 - 원료, 사용, 폐기 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 경계설정 명확 ○ 분석대상의 생산에 드는 모든 제품 및 공정 포함 ○ 제품개선을 위한 주요인 도출 가능 ○ 자료수집용이 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 원료의 채취로 인한 중요한 환경영향 간과우려 ○ 수명주기의 중요한 영향 무시 가능성 존재
특정 환경문제에 집중하고 범위의 축소	<ul style="list-style-type: none"> ○ 목록분석 생략, 평가 위주 ○ 목록 중 특정 사항 제외 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 사용자 요구에 집중하여 활용도 우수 ○ 실행가능성과 자료 신뢰성이 높음 ○ 목록 범위를 축소로 관심부분에 집중 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 중요한 환경 고려사항의 제외 가능성 상존
자료 이용법	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정량적, 정성적 자료의 병행 사용가능 ○ 유사 제품, 공정에 대한 자료의 인용 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 수명주기의 모든 단계에서 환경문제 발견 가능 ○ 획득 불능 자료에 대한 추정 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 제품 비교, 환경문제 등에 대해 객관적 비교 곤란 ○ 선택의 문제
연구 요소의 제한	<ul style="list-style-type: none"> ○ 일정 수준 이하의 성분제외 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 중요하다고 예상되는 항목에 중점 연구 가능 ○ 명확한 정의 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 제외된 요소의 중요성 간과 우려

주) '수명주기분석에 관한 연구', 연세대 관리과학대학원, 1999에서 발췌 인용

V. 결론 및 향후 추진 방향

발전원별 환경영향 분석의 목적이 기존에 수행되고 있었던 연료원이나 발전원별 연소특성 혹은 환경보호시설의 기술특성 분석과 같은 미시 분석시각 뿐만이 아니라 발전원별 환경영향 분석에 있어 거시적 의사결정 변수의 구축도 중요하다면 이제부터라도 분석시각을 기존의 연료별 연소특성 분석에서 수명주기분석으로 확장할 필요가 있다.

수명주기분석은 그 특성상 조사대상이 되는 산업의 종류가 매우 폭넓게 분포되어 있고, 또한 개별 산업도 분석이 복잡한 중후장대 산업들이 연관되어 있다. 따라서 이러한 분석을 위해서는 각 발전원들의 프로세스를 분석하는 것도 중요하지만 이것에 못지 않게 관련산업들의 에너지 수지 특성을 정확히 분석하는 것도 중요하다. 수명주기분석을 통해 신뢰할 수 있는 결과를 도출하기 위해서는 관련 산업을 한눈에 조망할 수 있는 기술정책 전문가의 식견이 필수적이다.

특히 소재 제조에서부터 폐기물 처리에 이르기까지 관련되는 여러 산업들의 에너지 수지에 관한 자료를 정확하고 일관되게 도출하기 위해서는 기존의 방법이 자료의 신뢰성, 분석의 객관성, 해법의 다양성, 동적 분석능력의 요구 증대 등에서 보완될 필요가 있다. 이 점을 감안하면 산업연관 분석과 같은 활용이 필요하다. 특히 산업연관분석은 미국의 Carnegie Mellon 대학에서 EIO-LCA로 개발되었고, 일본의 CRIEPI에서 Quick-LCA로 개발되어 기존의 방법들에 비해 신뢰도 면에서 열등하지 않은 결과를 도출하고 있다(4,6).

또한 발전원별 환경영향 평가가 현재의 문제만이 아니라 미래의 문제도 함께 고려해야 보다 유용한 결과를 도출할 수 있다고 볼 때 발전에 이용되는 기존의 상용기술뿐만 아니라 미래에 개발될 수 있는 발전기술과 환경관련시설 등에 대한 신기술과 함께 지구온난화를 방지할 수 있는 대체기술의 도입 가능성도 예측하여야겠다.

참 고 문 헌

1. 김신중, "기후변화협약에 대응한 전력정책 방향", 지구온난화 문제에 관한 심포지엄, 한국원자력문화재단, 1998. 10.
2. 정환삼 외, "전원별 환경영향 평가를 위한 수명주기분석기법 적용 방안 연구", 1998 에너지공학회 추계학술발표회, 1998
3. 한국과학기술원, "수명주기분석의 기법개발과 국내산업에의 적용", 환경부, KAIST-189/96, 1996.
4. Chris T. Hendrickson et al., "Comparing Two LCA Approach: A Process Model- vs. Economic I-O- Based Assessment", Green Design Initiative, Carnegie Mellon Univ., 1997 IEEE IS on Electronics and the Environment, 1997. 5
5. CRIEPI, "Energy Requirement and CO₂ Emissions in the Product of Goods and Services : Application of an I/O Table to Life Cycle Analysis", Y95013, 1996. 5.
6. CRIEPI, "Advanced LCA Method of Products with the Japanese I/O Table", Y97015, 1998.
7. K. Nishimura et al., "Estimating Embodied Energy of Goods Using the Input-Output Table", CRIEPI Report No. Y95007, 1996
8. Lave, Lester B., Elisa Cobas-Flores, Chris T. Hendrickson, and Francis C. McMichael, "Using Input-Output Analysis to Estimate Economy-Wide Discharges", Environmental Science and Technology, 29(9), 1995
9. Lawrence J. Hill et al., "The Principles of Life-Cycle Analysis", ORNL/TM-13178, 1996
10. Yohji Uchiyama, "Life Cycle Analysis of Power Generation Systems", Central Research Institute of Electric Power Industry(CRIEPI) Report No. Y94009, 1995