

산업연관분석을 이용한 원자력발전의 환경영향 평가 방안 연구

정 환삼, 윤 성원
한국원자력연구소

A Study on the Estimation of Environmental Burdens of Nuclear Power through Economic I-O Method

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

요 약

수명주기 분석은 성숙한 산업사회에서 파생되는 반대급부의 문제와 여기에서 야기되는 영향을 정량화 하려는 과정에서 쓰이는 시스템 접근법(system approach)의 하나이다. 이 분석은 재화나 용역 혹은 기술의 수명주기 전반에서 발생하는 오염문제를 중심으로 환경에 미치는 영향을 종합적으로 연구하려는 것이다.

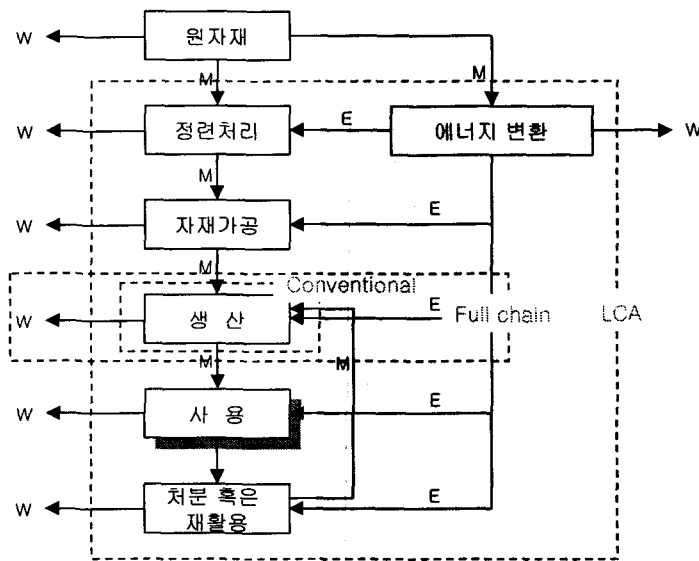
이러한 분석 개념의 유용성으로 인해 1990년 대 이후 선진국들에서 활용이 활발해지고 있으며, 최근 우리 나라에서도 생산기술의 환경영향 평가에 적극 활용되고 있다. 이 방법의 적용에는, 특히 계량화 방법으로는, 지금까지 직접조사방법이 주로 적용되고 있으나 이의 적용에는 전문가에 의한 많은 시간과 노력이 경주되어야 하기 때문에 현실적인 어려움에 봉착하게 된다.

이 점에서 본 연구에서는 원자력발전의 환경영향 평가에 있어 기존의 직접조사방법의 어려움을 극복하기 위해 산업연관분석의 활용을 모색하였다. 이 방법은 위와 같이 산업연관분석이 갖는 본원적 한계에도 불구하고 본래 평가목적을 달성하는 데 있어 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

I. 원자력발전의 환경영향 평가 방법

1. 수명주기평가의 필요성

수명주기 분석은 성숙한 산업사회에서 파생되는 반대급부의 문제와 여기에서 야기되는 영향을 정량화 하려는 과정에서 쓰이는 시스템 접근법(system approach)의 하나이다. 이 분석은 <그림-1>에서 보이는 바와 같이 재화나 용역 혹은 기술의 수명주기 전반에서 발생하는 오염문제를 중심으로 환경에 미치는 영향을 종합적으로 연구하려는 것이다. 그리고 경우에 따라서는 여기서 나아가 복합적 문제로 인해 복잡한 환경영향을 미치는 각 요소를 명확하게 하는 것으로 환경부하를 줄이는 구체적인 해결책의 강구에 도움이 되기도 한다.



<그림-1> 수명주기분석(LCA)의 분석 범위

이러한 수명주기분석 노력은 서구 선진국에서는 일찍이 1970년경부터 이루어져 왔으나 우리 나라에서는 그 동안의 급속한 경제성장과 개발논리의 지배로 관심을 끌지 못하다가 1990년대에 들어서야 비로소 민간부문의 상품들에 대한 환경특성 평가를 위해 시험적으로 적용되고 있다. 그러나 아직 그 활용이 활발한 편은 아니다.

전과정 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 Recommendation C(90) 164를 통해 회원국들에게 원료부터 폐기까지 제품의 전과정(Life Cycle)을 고려한 종합적인 오염 예방정책 시행을 권고한 바 있다.

일본은 미국과 유럽 선진국들이 국제기구를 중심으로 추진하고 있는 이러한 무역과 환경의 연계 움직임에 대응하기 위하여 1990년부터 통산성, 과학기술청, 환경청의 지원으로 전

과정 평가 기법을 국내에 보급·정착시키기 위한 연구개발 사업을 활발히 추진중이다. 특히 일본 전력중앙연구소에서는 20년간 축적된 에너지분석 연구 경험을 바탕으로 전과정 평가 수행에 필요한 에너지부문의 기본 데이터를 제공하고 있으며 기후변화협약에 대응하기 위한 발전 플랜트의 전과정 에너지 및 지구온난화가스 배출량 분석 등을 수행하고 있다.

2. 산업연관분석 기본 모형

본 연구의 산업연관분석에서 사용한 기본적인 기호는 다음과 같이 정의한다.

A : 투입계수 행렬 M : 총수입액 벡터
 X : 부문별 총산출액 벡터 I : Identity 행렬
 Y : 부문별 최종생산액 벡터

산업연관표에서 생산활동의 선형성 가정을 포함한 투입-산출 관계는 식 (1)과 같다. 이 식은 본 연구에서 이용할 모형을 수립하는 데 기본이 되는 형태이다.

$$A_{n \times n} X_{n \times 1} + Y_{n \times 1} - M_{n \times 1} = X_{n \times 1} \quad \text{----- (1)}$$

전력의 공급지장비를 추정하기 위해 산업연관표를 이용할 경우 산업연관표에서 전력의 가치는 생산유발계수나 혹은 부가가치 유발계수의 행렬을 이용하여 평가한다. 이들 계수의 산출과정과 의미는 다음과 같다.

위의 식 (1)을 총산출액 X 에 관해서 풀면 다음의 식과 같이 된다.

$$X = (I - A)^{-1} (Y - M) \quad \text{----- (2)}$$

식 (2)에서 $(I - A)^{-1}$ 행렬은 수학적으로 그대로 레온티에프 역행렬 혹은 그 의미에 따라 생산유발계수행렬이라고도 한다. 이 식을 통하면 최종수요 Y 와 수입 M 의 변동에 따라 각 산업부문에서 직·간접으로 유발되는 총산출액을 구할 수가 있다. 따라서 생산유발계수는 최종수요가 1단위 증가했을 때 이를 충족시키기 위해 각 산업부문에서 직·간접으로 얼마나 생산하여야 하는가를 나타내는 것이다.

본 연구에서는 자가소비의 축차적 과정을 잘 반영하고 있는 식(2)의 생산유발계수를 사용하기로 한다.

3. 산업연관분석 적용 사례

재화가 최종적으로 수요되기까지 직접 간접으로 환경에 미치는 영향을 산업연관분석을 응용하여 계량화하거나 비교하려는 시도는 1970년대부터 있었다. 환경영향 요인으로는 에너지를 비롯해서 CO₂ 등을 대상으로 분석하였다. 이러한 연구에서 주로 사용되고 있는 방법들은 주로 분석대상 시스템을 직접 조사하는 직접조사방법(process model)이 사용되어 왔다. 이 방법은 특정 제품이나 기술과 같이 단위기술에 적용하면 좋은 결과를 기대할 수 있다.

이 외에도 산업연관표를 이용하는 방법이 도입되고 있다. 이 방법은 분석대상 재화나 용역을 구성하고 있는 부문들 간의 상호의존 관계를 경제활동의 관계로 나타내고 있는 산업연관표를 이용하는 방법으로 일부 연구에서 적용하여 그 유용성을 검증하고 있다. 이 방법은 분석 대상 시스템의 부문에 따라 일상적인 운영에 대해서는 직접 측정방법을 혼합해 사용하기도 하나, 이 경우에도 시스템의 건조와 해체에 대해서는 산업연관분석을 적용하고 있다.

산업연관분석 방법은 생산과정들간의 상호연관성들을 포착한다. 산업연관표는 복잡한 경제의 상호관계를 나타내고 있다. 예를 들어 Lave 등(1995)은 다섯 가지 제품의 환경영향을 분석하기 위해 519개의 부문으로 나뉘어진 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. 이는 전형적인 오염원들의 평균배출에 대한 상세한 자료를 사용할 수 없었기 때문이었으며, 따라서 독성 배출과 전기의 사용에 관한 당시의 분석은 제한적으로 수행되었다. 또한 일본의 연구에서는 기존의 발전원 뿐만 아니라 신·재생 발전원도 포함하여 이들의 환경오염 수준을 지구온난화의 관점에 두고 CO₂와 CH₄ 배출에 대해 각 발전 단계별로 평가·비교하였다.

한편 국내의 연구에서는 이강희(1998)에 의해 공동주택의 수명기간동안 환경영향을 CO₂를 기준으로 평가하였으며, 시스템의 구분은 공동주택의 건설, 유지관리, 철거·해체의 단계로 구분하여 각 단계별로 건축자재와 재료부문, 냉난방 등의 운용부문, 철거·해체시 기계·장비의 투입부문으로 나누어 정립하였다. 산정방법은 산업연관분석법과 현장실사 자료를 분석하는 두 가지 방법을 혼용하였다. 산업연관분석은 주택의 건설과 해체시 요구되는 건축자재와 재료부문에 적용하였다.

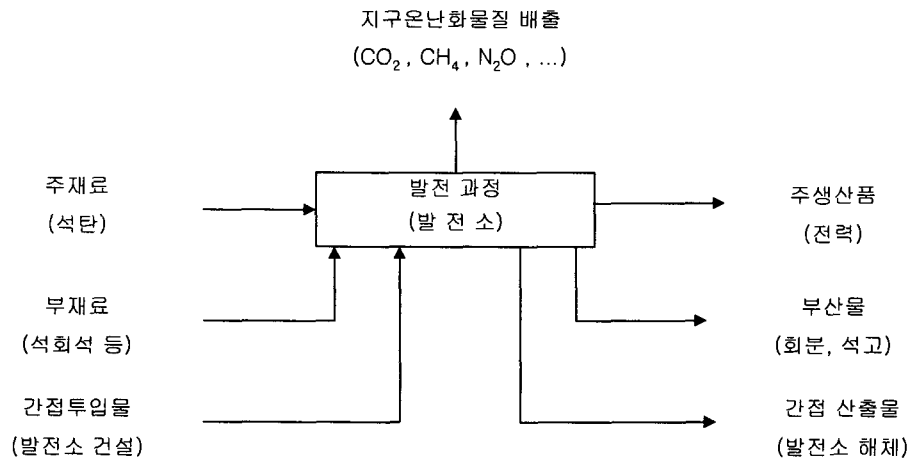
II. 평가모형 제안

1. 원자력발전의 환경영향 평가 모형

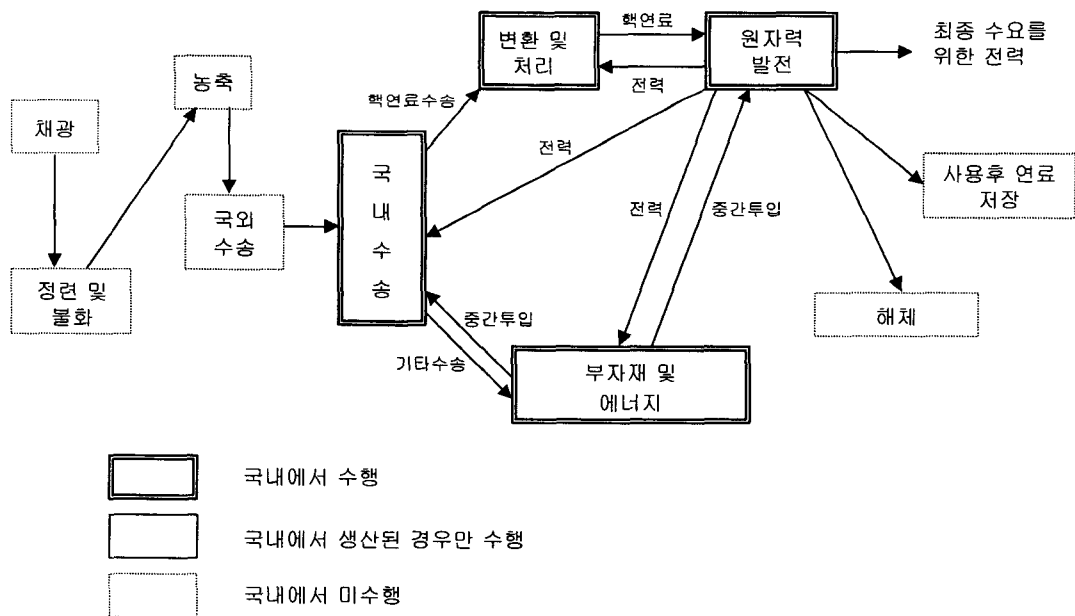
원자력발전 과정은 <그림-2>와 같은 화석연료 발전소들과 마찬가지로 발전소의 건설, 발전을 위한 운전, 그리고 발전소 및 관련시설의 해체라는 과정으로 크게 구분할 수 있다. 발전의 환경영향 평가라는 관점에서 보면 이들 세 개의 과정에서 건설과 해체는 프로젝트 성격을 갖는다는 점에서 유사한 속성을 갖고 있다. 이에 비해 발전은 운전·유지와 같은 일상적인 활동이 수명기간동안 지속되기 때문에 위의 두 과정과 다른 속성을 갖고 있다. 이 점에서 기존의 연구(3, 16)에서도 이들 과정의 이질성을 감안해 전자의 과정에 대해서만 산업연관분석을 적용하고 있다(<그림-3> 참조).

하지만 본 연구에서는 분석의 객관성을 상실하지 않고 국내 자료의 부족을 극복하기 위

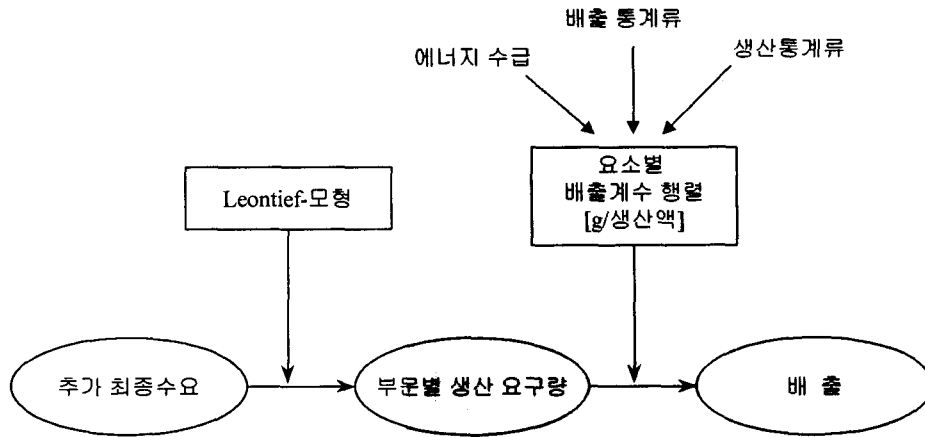
해 <그림-4>에서 보이는 바와 같이 모든 과정에 대해 산업연관분석을 적용하는 방안을 강구하기로 한다. 다만 과정의 이질성과 추정결과의 활용도 증대를 위해 기존의 연구 사례들과 같이 건설과 해체를 하나로 묶고 발전을 다른 하나로 하여 두 개의 부분으로 구분해 원자력발전의 환경영향 평가모형을 제안하기로 한다.



<그림-2> 석탄화력 발전소의 수명주기 기본 구분



<그림-3> 원자력발전의 수명주기에 있어 투입-산출 흐름



<그림-4> 산업연관분석을 통한 원전의 환경영향 평가 절차

우선 원전의 건설과 해체에 따른 배출량을 구하는 모형은 다음과 같다.

$$E_i^j = e_i^j(I-A)^{-1} f \text{ ----- (3)}$$

여기에서

- E_i^j : 과정 j 에서 오염원 i 의 배출량,
- e_i^j : 과정 j 에 따른 오염원 i 의 배출계수 벡터,
- f : 과정 j 의 활동 벡터,
- i : 추정대상 오염원 ($1=CO_2$, $2=CH_4$, $3=N_2O$, $4=CF_4$),
- j : 과정 ($1=건설$, $2=해체$)

다음으로 원전의 운전·유지에 따른 배출량도 다음과 같다.

$$E_i^3 = e_i^3(I-A)^{-1} [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T \text{ ----- (4)}$$

여기에서

- E_i^3 : 원전의 운전·유지에 따른 오염원 i 의 배출량,
- e_i^3 : 원전의 운전·유지에 따른 오염원 i 의 배출계수 벡터,
- $[0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T$: 원자력발전 부문,
- i : 추정대상 오염원 ($1=CO_2$, $2=CH_4$, $3=N_2O$, $4=CF_4$)

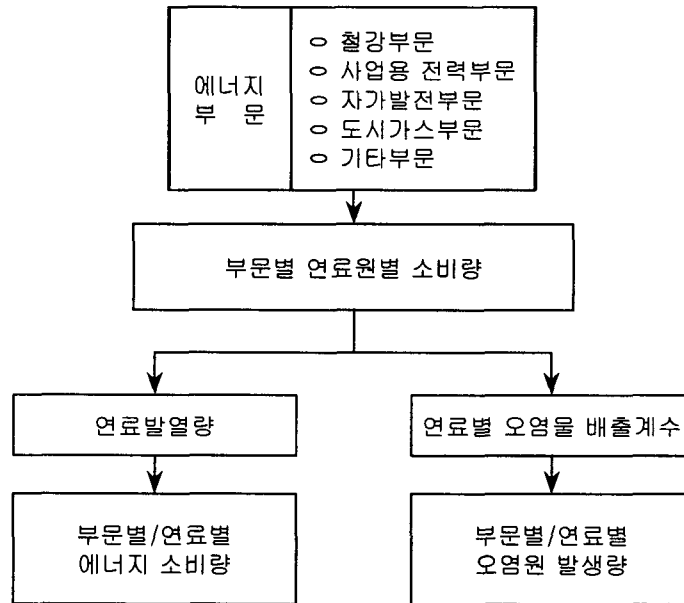
따라서 원자력발전에 수반되는 지구온난화 측면의 환경영향 총량은 다음과 같이 평가될 수 있다.

$$E = \sum_{j=1}^3 E^j \text{ ----- (5)}$$

2. 수행시 필요 조건

수명주기 분석에 있어 산업연관분석 모형을 국내 원자력발전에 적용하기 위해서는 입력

자료의 준비와 가공에 많은 노력을 기울여야 한다. 물론 전술한 바와 같이 직접 조사법에 비해서는 데이터 수집의 노력이 월등하게 적게 소요되지만 원자력 발전소 건설, 운전, 해체와 관련한 산업부문의 에너지 및 자재의 투입-산출 정보의 분석능력은 기본적으로 갖추어져야 한다. 각 부문별·연료별 에너지 소비량과 지구온난화가스 배출량 추정과정을 나타내면 다음 <그림-5>와 같다. 이를 위해서는 경제통계나 산업연관표는 물론이고 이 밖에도 부문별 자료 수집을 위해 철강, 전력, 가스, 석유, 그리고 에너지 분야에서의 연보나 월보 등의 자료를 입수·가공하는 과정이 필요하다.



<그림-5> 부문별 에너지 소비 및 오염원별 발생량 추정 과정

이밖에도 이러한 자료들을 분석할 수 있는 능력과 함께, 산업연관분석의 정태성을 극복하기 위해 이를 지속적으로 유지·관리할 수 있는 분석자의 능력이 요구된다.

3. 적용시 기대 유용성

수명주기평가법은 분석 결과만이 아니고 분석과정에서 축적된 경험의 가치가 갖는 일반적인 장점에도 불구하고 현장에서 쉽게 적용되지 못하는 이유는 크게 입력자료와 분석수단 그리고 경계 처리방법에서 찾을 수 있다.

구체적으로는 자료의 측면에서 너무 상세하면서도 방대하고 정확한 입력자료를 필요로 하고, 분석 방법도 하나의 완전한 방법이 있는 것이 아니고 다양하게 존재한다. 또한 분석 범위의 설정에서 경계부문의 처리문제가 자의적으로 구분될 수 있어 분석 결과에 대한 논쟁의 여지가 있다는 것이다. 따라서 원자력 발전의 환경영향과 같이 기존의 기술보다 원자력

의 미래기술과 같은 신기술에 대한 평가를 위해서는 보다 더 많은 시간과 노력이 투입되어야 한다는 것이다.

이와 같이 수명주기분석법이 갖는 적용의 어려움은 입력자료의 필요량에 비례하여 기하급수적으로 가중된다. 따라서 분석의 기초자료가 불충분한 대부분의 개발도상국에서는 이를 적용하기 쉽지 않은 것이 현실이다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서 사용한 산업연관분석법은 직접조사법에 비해 분석의 정확성이 다소 떨어질 수는 있으나, 분석의 효율성과 객관성에서는 결코 열등하다고 하기는 어렵다.

III. 결론 및 고찰

산업연관분석은 경제 전체를 유사 부문별로 집단화하고, 이들 각 부문간의 거래관계를 일목요연하게 나타내고 있기 때문에 한 시점의 경제활동을 분석하기에는 적절한 방법이다. 더욱이 선형대수학을 이용한 레온티에프 모형을 이용하면 각 부문의 상호관계에서 발생하는 직접·간접의 투입-산출 관계를 적은 노력으로 비교적 신뢰할만한 수준으로 추정하기에 적합한 모형이다.

그러나 산업연관분석은 본원적으로 다음과 같은 한계를 내포하고 있다. 즉 최종 소비자의 사용 단계에서 발생하는 에너지 소비나 환경오염을 반영하지 못한다는 것이다. 다음으로 한 경제의 산업활동 전체를 400~500개의 수준의 부문으로 구분하기 때문에 여러 재화간 부문으로 분류되어 분류의 동질이 결여될 수 있다. 이 경우 산업연관분석에서는 이들의 평균치를 대표치로 사용하기 때문에 특정 재화나 서비스의 경제활동을 분석할 때에는 분석 오차가 발생할 수 있다. 마지막으로 우리 나라의 산업연관표 작성은 연장표를 제외하면 매 5년마다 수행되기 때문에 조사시점 기준의 경제구조를 기술하는 데서 오는 한계이다. 이로 인해 산업연관분석은 기준 년도를 기준으로 하는 정태적 분석에 더욱 적합한 것으로 평가되고 있다.

본 연구에서는 원자력발전의 환경영향 평가에 있어 기존의 직접조사방법의 어려움을 극복하기 위해 산업연관분석의 활용을 모색하였다. 이 방법은 위와 같이 산업연관분석이 갖는 본원적 한계에도 불구하고 본래 평가목적의 달성 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 전원개발계획의 수립과 같은 경우에는 평가 결과의 절대가치 보다는 상대가치가 더욱 중요하게 평가되어야 한다는 점을 감안할 때 전원별로는 원자력발전뿐만 아니라 다른 발전원과의 비교로 확장하고, 오염원별로는 수질과 대기 오염원의 분석까지 확장할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] 강광하, “산업연관분석론”, 비봉출판사, 1991.
- [2] 에너지경제연구원, “에너지통계연보”, 산업자원부, 1998.
- [3] 이강희, “건물의 환경친화성 평가방법에 관한 연구”, 연세대학교 대학원 건축공학과 박사학위논문, 1998. 12.
- [4] 통계청, “한국의 경제 지표”, 1998. 3.
- [5] 한국은행, “1998년 산업연관표 개요”, 2001. 4.
- [6] 한국은행, “산업연관분석해설 -원리와 이용-”, 1987.
- [7] 本藤祐樹 外, “産業連關分析による財・サービス生産時のエネルギー消費量とCO₂排出量-産業連關表のLCAへの適用について-”, 電力中央研究所, Y95013, 1996. 3.
- [8] 西村一彦 外, “産業連關表を用いた製品のエネルギー消費量の推定”, 電力中央研究所, Y95007, 1996. 3.
- [9] 内山洋司 外, “産業連關表を利用した製品のLCA手法-簡易に計算できるソフトウェア “Quick LCA”の開発-”, 電力中央研究所, Y97015, 1998. 3.
- [10] 本藤祐樹 外, “産業連關表を用いた我が國の生産活動に伴う環境負荷の實態分析”, 電力中央研究所, Y97017, 1998. 6.
- [11] 本藤祐樹 外, “ライフサイクルCO₂排出量による發展技術の評価—最新データによる再推計と前提條件の違いによる影響—”, 電力中央研究所, Y99009, 2000. 3.
- [12] 本藤祐樹, “ライフサイクルCO₂排出量による原子力發展技術の評価”, 電力中央研究所, Y01006, 2001. 8.
- [13] C. Hendrickson et al., "Comparing Two Life Cycle Assessment Approaches : A Process Model- vs. Input-Output-Based Approach", 1997 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, San Francisco, CA., 1997. 5.
- [14] C. Hendrickson et al., "Economic Input-Output Models for Environmental Life-Cycle Assessment", Environmental Science & Technology News, 1998. 4.
- [15] E. Böhm and R. Walz, "Life-cycle-analysis: a Methodology to Analyse Ecological Consequences within a Technology Assessment Study ?", IJTM, Special Publication on Technology Assessment, 1996.
- [16] J. Proops et al., "The Lifetime Pollution Implications of Various Types of Electricity Generation: An I-O Analysis", Energy Policy, Vol. 24, No.3, 1996.
- [17] L. Lave et al., "Using Input-Output Analysis to Estimate Economy-wide Discharges",

Environmental Science & Technology Vol. 29, No. 9, 1995.

- [18] R. Friedrich and T. Marheineke, "Life Cycle Analysis of Electricity Systems: Methods and Results", IAEA-TECDOC-892, 1994. 10.