

CANDU-6 소내전산기의 중성자속 분포 계산 알고리즘 평가

염충섭, 유호규, 김형진, 김용배*
고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터
*한국전력연구원 원자력연구실

An Estimation of the DCCS Algorithm Used for Calculating Flux Distributions in CANDU-6 Core

Choong-Sub Yeom, Ho-Kyu Ryu, Hyung-Jin Kim, Yong-Bae Kim*
Institute for Advanced Engineering, Plant Engineering Center
*Korea Electric Power Research Institute, Nuclear Power Laboratory

1. 서론

CANDU-6 원자력발전소에서의 주요 제어기능들은 소내전산기인 Digital Control Computer System(DCCS)에서 수행된다. 이 시스템은 운전 경험 측면에서 제어 알고리즘을 조절할 수 있는 유연성을 부과하며 서로 관련된 시스템과 연결되어, 시스템간의 통신 단순화 및 Self-checking을 통한 신뢰도를 향상시킨 상태에서, 정보를 수집하는 역할을 한다. 또한 시스템은 노심의 안정성과 관련된 운전기술지침서상 제반 제한사항의 확인 및 핵연료 교체 등의 노심 운전 지원을 위한 도구로서의 기능도 수행하고 있다. 이러한 기능 중 노심내의 출력 분포 상태를 파악하기 위한 출력 분포 산출 알고리즘의 정확도를 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 소내전산기에 내장되어 있는 중성자속 분포 계산 알고리즘을 이용한 산출 결과가 실제 노심 상태를 얼마만큼 정확하게 고려하고 있는가를 평가하기 위하여 소내전산기인 DCC-X(Digital Control Computer - X)의 중성자속 분포 계산 알고리즘을 이용한 중성자속 산출 결과와 핵연료 교체를 위한 코드인 RFSP(Reactor Fueling Simulation Program) 코드를 이용한 중성자속 분포 계산 결과를 비교, 평가 하였다. 또한 RFSP 코드를 이용하여 노심감시계통 설계에 타당한 출력계산 알고리즘을 구축하기 위해 코드내 출력 계산 알고리즘간의 비교도 이루어 졌다.

본 검증에서는 노심의 실제 운전 이력을 이용하여 RFSP 코드 내의 노심출력계산 알고리즘을 검증하였다. 구축된 출력계산 알고리즘을 이용하여 특정한 섭동이 없는 시간(2001. 2.19 08:00 - 10:00) 동안 2분 간격으로 운전자료를 추출하여 중성자속 및 출력을 계산하여, 노심내 계측기로부터의 계측값과 지도화된 중성자속, 확산방정식에 의해 계산된 중성자속을 각각 비교하여 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

2. 이론 및 방법

2.1 소내전산기(DCC-X) 출력계산 알고리즘

발전소 제어 컴퓨터 시스템의 하드웨어는 두 개의 독립적인 컴퓨터인 DCCX와 DCCY, DCCZ로 구성되어 있으며 DCCY는 DCCX의 보완 개념으로서 역할을 하고 있다. DCCZ는 DCCX와 DCCY와 동일한 기능을 가지고 있으나 입력 및 출력에 대한 제한이 있고 DCCX와 DCCY에 연결이 되어 있지 않다,

DCCX에 내장되어 있는 중성자속 및 출력 분포 계산 알고리즘은 그림 (1)과 같이 구성되어 있다. DCCX 컴퓨터에는 평형노심에 대한 중성자속 분포를 이용한 계측기 위치에서의 중성자속과 평형노심에 대한 확산방정식의 해법에 따른 “modeset”이 내장되어 있다. 이를 이용하여 바나듐 중성자속 계측기로부터의 계측치를 이용하여 내장되어 있는 계산값들과의 차를 이용한 최소자승법으로서 새로운 중성자속 분포를 결정하게 된다.

DCCS 출력계산 알고리즘

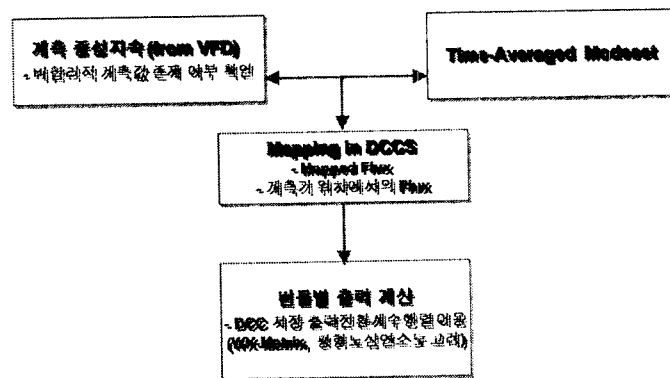


그림 (1) DCCX 출력계산 알고리즘

2.2 RFSP코드 출력계산 알고리즘

현재 현장에서 사용중인 RFSP 코드의 기능은 크게 노심설계와 노심 이력추적으로 나눌 수가 있다. 노심 설계를 위한 세부 기능으로는 핵연료 교체 구조와 핵연료 연소도를 고려한 노심내 영역 결정, 평형노심 중성자속과 출력 분포 결정, 예상 핵연료 연소도, 핵연료교체율, 핵연료 평균 연소시간등이며 노심 이력 추적에 대한 세부 기능으로는 각 핵연료 번들의 중성자 조사 이력 유지와 노심의 핵연료연소도 계산 간격 모델링, 운전중 중성자속과 출력 분포 계산, 채널/번들출력, CPPF(Channel power peaking factor) 감시(by detector & DCC), 교체대상 핵연료 결정을 위한 참조등이 있다.

RFSP코드내에서 중성자속을 계산하는 방법으로는 1) 노심의 상태(제어봉 위치 등)를 고려한 확산방정식을 이용해 수렴된 중성자속 분포, 2) 노심내에 장착된 바나듐 중성자속 계측기로부터의 계측치, 3) 1)과 2)를 이용하여 산출된 지도화된 중성자속 분포가 있다. 그림

(2)에서 보는 바와 같이 본 시뮬레이션에서는 각 방법에 의한 중성자속 분포를 계측치를 기준으로 하여 그 편차를 평가하며, 각 계산 시간 간격에서 확산방정식의 해를 이용하여 "Fundamental modeset"을 구하여 Flux Mapping을 하였다.

출력 계산 흐름도

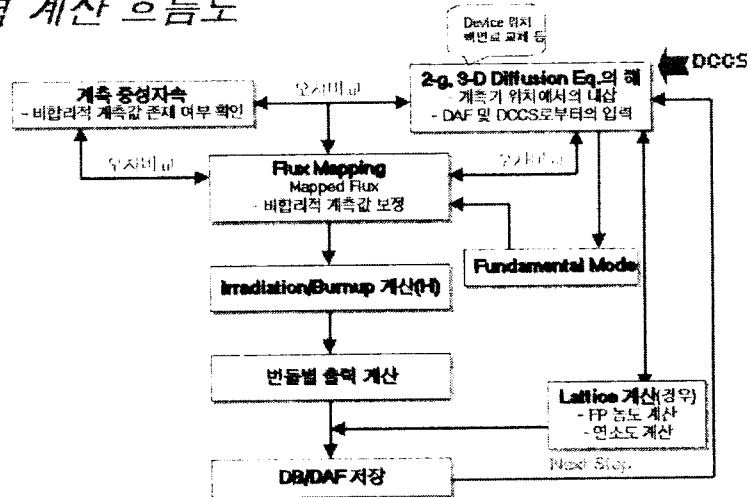


그림 (2) RFSP코드내의 출력 계산 흐름도

2.3 Flux-Mapping 이론

Flux mapping은 중성자속이 기본함수("Flux modes")의 선형조합 형태에 대한 중성자속 합성 방법(Flux synthesis method)으로서 목적은 측정 중성자속에 대해 mapped flux를 가장 적절하게 합치시키기 위해 진폭을 결정하는 것이며, 모드의 진폭 계산은 RFSP내의 *FLUXMAP 모듈에서 수행된다. 중성자 합성 방법에서 각 모드의 진폭(amplitude)은 노심내 바나듐 중성자속 계측기에 의해 측정된 중성자속에 대해 합성된 중성자속을 최적으로 조화시킴으로서 결정된다.

일반적으로 모드의 개수보다 중성자속계측기가 많다. 즉, CANDU6에서는 중성자속계측기의 수가 102개이며 Flux mapping에서 사용되는 모드의 개수는 15 - 28 범위내에 있다. 모드의 개수 즉, 미지수 를 이용하여 102개의 측정 중성자속과 완벽하게 조화시키는 것은 불가능하기 때문에 Flux-mapping 방법은 측정 중성자속에 대해 mapped flux를 최소자승법(least-square method)에 의해 이루어진다.

여기서 Flux mapping은 중성자확산방정식에서 사용된 mesh중심의 중성자속 분포를 구하는 것이 아니라 변들중심의 중성자속 분포를 구한다.

FLUX-MAPPING

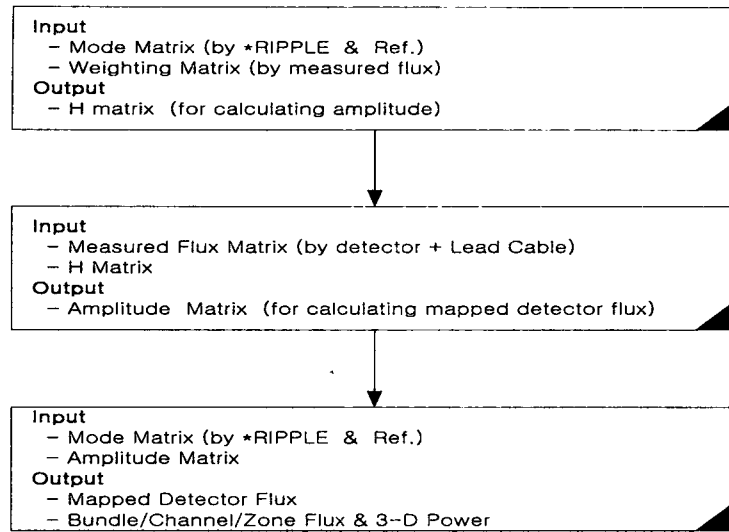


그림 (3) Flux Mapping 알고리즘

2.4 평가 방법 및 조건

정상상태에서 구축된 출력계산 알고리즘을 검증하기 위한 시뮬레이션은 아래와 같은 조건에서 수행되었다.

- 1) 시뮬레이션 조건
 - 시뮬레이션 기준 시점 : 2001. 2. 19 08:00 기준(5524FPD)
 - 2001.02.19 08:00 - 2001.02.19 10:00 : RFSP 시뮬레이션 (2분 간격으로 2시간)
 - 2001.02.19 08:00 - 2001.02.19 10:00 : DCCS 알고리즘에 따른 시뮬레이션 (2분 간격으로 2시간)
- 2) 시뮬레이션을 위한 추출 입력
 - 1분 간격 자료 추출
 - . LZC 개별 준위(14개)
 - . 계측 중성자속(102개)
 - . 총출력

상기의 조건에서 수행된 결과에 대해 아래의 사항을 검토한다.

- 1) 최종시점(2001.02.19 10:00)에서의 현장 계측치/내삽 Flux의 편차 평가
- 2) 최종시점(2001.02.19 10:00)에서의 조정 Flux/Mapped Flux의 편차 평가
- 3) 시뮬레이션 기간 동안의 평균 LZC 준위와 개별 LZC 준위 변화 및 Tilt 평가
- 4) 시뮬레이션 기간 동안의 총출력 변화
- 5) 시뮬레이션 기간 동안의 조정 Flux/Mapped Flux의 편차 변화
- 6) 시뮬레이션 기간 동안의 현장 계측치/내삽 Flux의 편차 변화
- 7) 시뮬레이션 기간 동안의 최대 번들 및 채널 출력 변화

3. 결 과

본 시뮬레이션은 2001. 2. 19 08:00에서 10:00까지 DCCS로부터 게이트웨이를 통해 받은 바이너리 파일을 읽어 나온 현장 값을 이용하여 수행되었다. 그 결과로서 DCCS에 알고리즘에 따른 중성자속 분포와 RFSP코드를 이용하여 계산된 현재의 중성자속 분포를 이용한 Flux Mapping의 결과와 비교되었다.

이 시뮬레이션은 그림 (4)과 (5)에서 보는 바와 같이 수위영역제어기(LZCs : Liquid Zone Controllers)의 수위 변화를 통해 노심내의 출력 분포 변화가 거의 없는 조건, 즉 정상상태로 가정할 수 있는 기간내에서 이루어진 것이다. 그림 (4)에서는 수위영역제어기 #1 - #7까지의 수위변화를 나타낸 것으로서 각각의 수위가 유지되고 있는 것을 알 수 있다. 수위영역제어기 #1과 #2는 평균 수위 아하에서 유지되고 있고, #4 - #7까지는 평균 수위 이상에서 유지되고 있다. #3은 평균 수위를 약간 상회하는 선에서 진동하고 있음을 보여준다. 또한 그림 (5)에서는 #8과 #9, #12, #14는 평균 수위이하에서 계속 유지되고 있으며 #10과 #11, #13은 평균 수위 이상에서 계속 유지되고 있음을 보여준다. 이러한 결과는 이 기간동안에 특정한 섭동이 주어지지 않고 있음을 보여주며 정상상태로 가정할 수 있음을 보여준다.

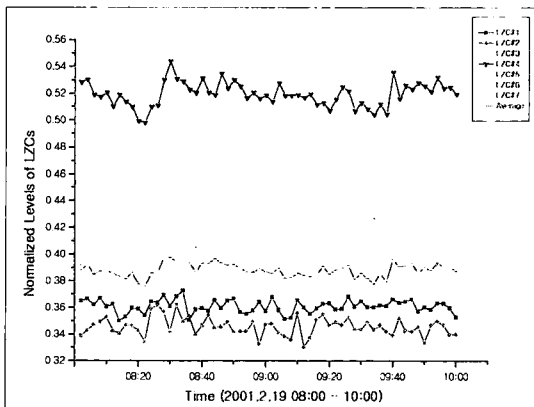


그림 (4) 수위영역제어기(#1 - #7)
수위 변화

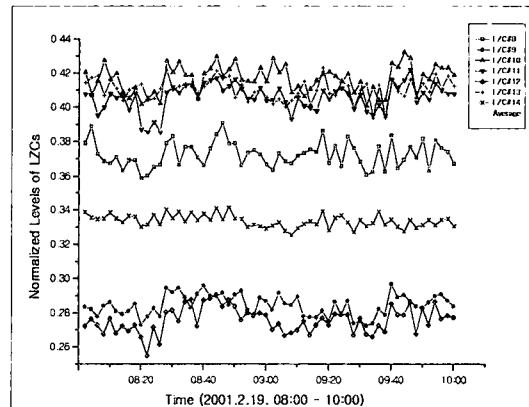


그림 (5) 수위영역제어기(#8 - #14)
수위 변화

그림 (6)은 시뮬레이션 기간동안 중성자속 계측값과 1.5 그룹, 3차원 중성자 확산방정식을 계산하여 계측기 위치에서 내삽한 중성자속 간의 평균 백분율 오차와 중성자속 계측값과 계산된 중성자속을 이용하여 계산된 지도화된 중성자속(Mapped Fluxes)간의 평균백분율 오차를 각각 나타낸 것이다. 그 결과는 중성자속 계측값과 1.5 그룹, 3차원 중성자 확산방정식을 계산하여 계측기 위치에서 내삽한 중성자속 간의 평균 백분율 오차가 0.12 에서 진동하고 있으며, 중성자속 계측값과 계산된 중성자속과 계측중성자속을 이용하여 계산된 지도화된 중성자속(Mapped Fluxes)간의 평균백분율 오차는 0.03 에서 진동하고 있음을 보여 준다.

그림 (7)은 시뮬레이션 기간동안 중성자속 계측값과 1.5 그룹, 3차원 중성자 확산방정식을 계산하여 계측기 위치에서 내삽한 중성자속 간의 평균 백분율 오차에 대한 표준편차와 중성자속 계측값과 계산된 중성자속을 이용하여 계산된 지도화된 중성자속(Mapped Fluxes)간의 평균백분율 오차에 대한 표준편차를 각각 나타낸 것이다. 그 결과는 중성자속 계측값과 1.5 그룹, 3차원 중성자 확산방정식을 계산하여 계측기 위치에서 내삽한 중성자속 간의 평균 백분율 오차에 대한 표준편차가 2.15 에서 진동하고 있으며, 중성자속 계측값과 계산된 중성자속을 이용하여 계산된 지도화된 중성자속(Mapped Fluxes)간의 평균백분율 오차에 대한 표준편차는 1.5 에서 진동하고 있음을 보여 준다. 이는 지도화된 중성자속이 계산된 중성자속에 비해 보다 작은 오차를 가지고 있음을 보여준다.

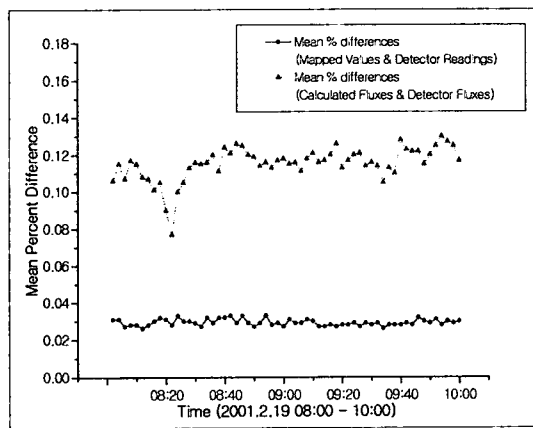


그림 (6) 계측중성자속과의 평균 백분율 오차 변화

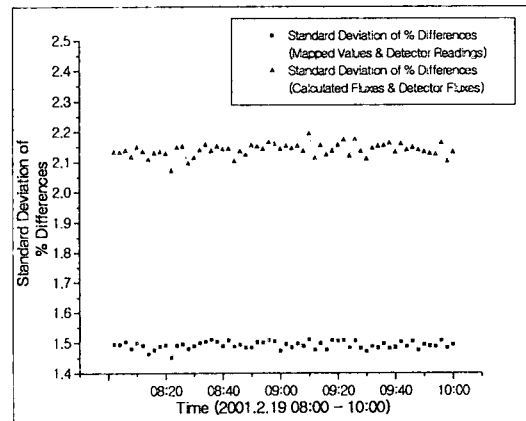


그림 (7) 계측중성자속과의 백분율 오차에 대한 표준편차 변화

시뮬레이션 기간동안 DCCS에 의한 중성자속 평균 백분율 오차는 그림 (8)에서 보는 바와 같이 0.02 - 0.03의 범위에 존재하고 있으며, 확산방정식으로부터의 중성자속과 계측치를 이용한 Flux Mapping에 따른 중성자속 평균 백분율 오차는 0.025 - 0.035 범위에 있다. 평균 백분율 오차는 DCCS의 결과가 작게 나타나고 있으나 양과 음의 오차끼리의 상쇄 효과가 있으므로 편차 평가에 대한 신뢰성을 부여하기 관련하여 이를 정확하게 반영하기 위해 백분율 오차에 대한 표준편차를 평가했다. 그림 (9)에서 보면 DCCS 결과에 따른 백분율 오차에 대한 표준편차는 3.2 정도이며, 확산방정식으로부터의 중성자속과 계측치를 이용한 Flux Mapping에 따른 백분율 오차에 대한 표준편차는 약 1.5 정도에서 유지되고 있다. 즉 표준편차의 경우 노심상태를 고려한 확산방정식 계산 결과 및 계측값을 이용한 Flux Mapping의 계산결과에 비해 DCCS의 결과가 상당히 높은 표준편차를 가지고 있다. 이는 DCCS로부터의 출력계산 결과는 노심상태에 따른 중성자속 계산 결과를 이용한 Flux Mapping 결과에 비해 신뢰도가 많이 떨어짐을 알수 있다.

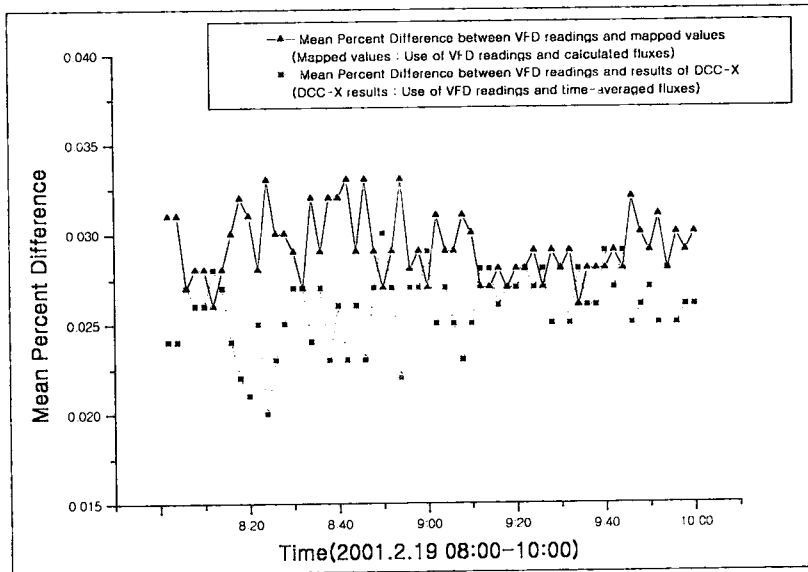


그림 (8) DCCS 중성자속의 평균 백분율 오차

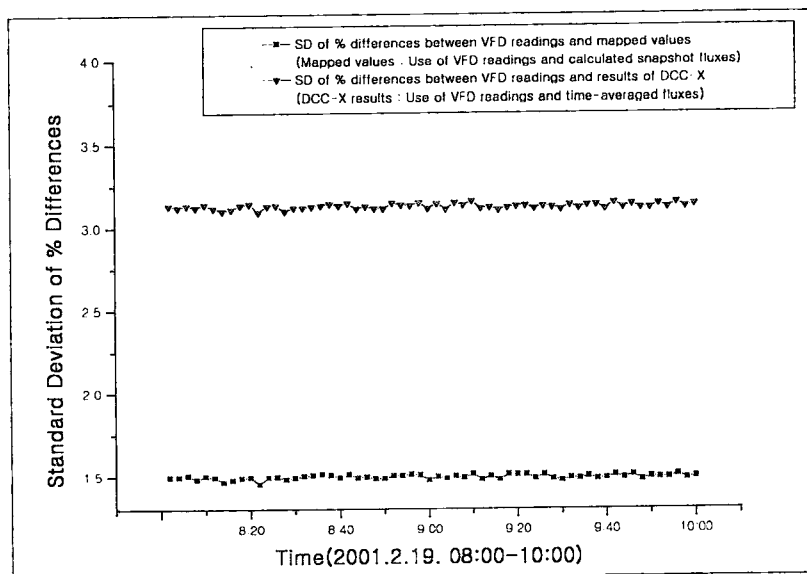


그림 (9) 계측기 위치에서의 백분율 오차에 대한 표준편차

4. 결 론

계산시간 간격을 2분 간격으로 하여 수행한 결과, 각 계산시점에서 백분율오차는 2-3%의 범위내에 수렴되고 있으며 지도화된 중성자속이 계산된 중성자속에 비해 보다 작은 오차를 가지고 있다. 또한 출력에서도 *SIMULATE에서 계산된 출력은 *FLUXMAP에서 계산된 출력에 비해 상대적으로 작게 나타나고 있다. 이러한 결과를 비교하여 볼 때 *FLUXMAP을 이용한 중성자속과 출력의 계산이 보다 보수적임을 알 수 있었다. 또한 DCCS의 알고리즘을 이용한 중성자속 분포는 편차가 3%를 벗어나고 있으므로 노심감시시스템을 위한 중성자속 분포 계산은 지도화된 중성자속(Mapped Fluxes)을 적용하는 것이 보다 타당성을 가진다는 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 짧은 시간동안 모사된 결과이기 때문에 보다 장시간과 많은 경우의 시뮬레이션이 필요할 것으로 판단되며 또한, 정상상태로 가정이 가능한 노심의 상태에서 수행한 결과이므로 추후 노심의 예방정비기간과 핵연료교체기간에 대한 시뮬레이션을 통해 지속적인 검증이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부산하 한국과학기술평가원에서 지원한 “중수로 원전운전 안전성 현안연구” 연구의 일부를 한국전력연구원의 위탁과제로서 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. William A. Boyd and R.Wade Miller, "The BEACON On-line Core Monitoring System : Functional Upgrades and Applications", Commercial Nuclear Fuel Division, Westinghouse Electric Corporation, Pittsburgh Penn. USA
2. CANDU 600 Generating Station Physics Design Manual, DM-59-01100, AECL, Canada
3. D.A. Jenkins, "RFSP User's Manual", COG-93-104, AECL, Canada, 1996
4. B.Rouben, "Description of the Lattice Code POWDERPUFS-V", AECL-11357, Canada, 1995
5. SeKi Oh & G. Kugler, "PMCR-A Power Mapping and Calibration Routing for 600MWe CANDU-PHW Reactors", Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 11(4), Dec. 1979