



# 燃料棒出力再構成法

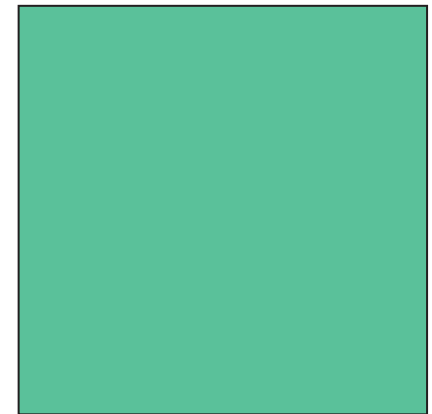
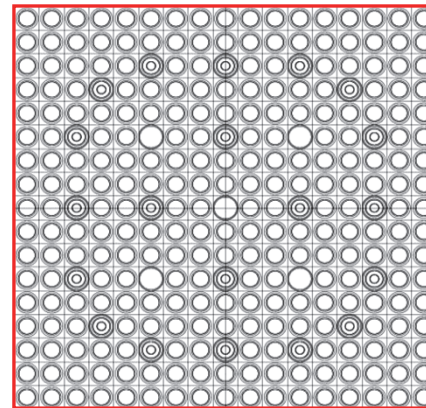
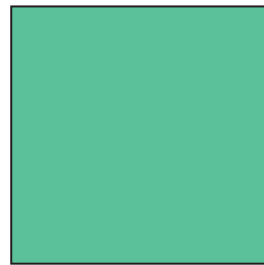
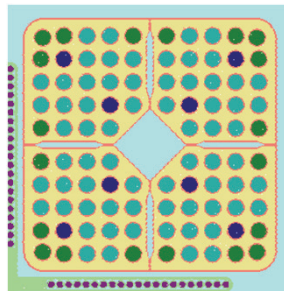
---

- ・燃料棒出力再構成
- ・燃料棒単位燃焼度の計算

参考: K. Rempe et al, Nucl. Sci. Eng., 103, 334 (1989).

# 近代ノード法と燃料棒出力再構成

- 近代ノード法では集合体内を均質化して取り扱う。
- そのため、燃料棒単位の出力分布を直接求めることができない。
- しかし、燃料棒単位の出力分布は熱的制限値の観点から極めて重要





# 燃料棒出力再構成

- 近代ノード法では、ノード内の中性子束分布を関数展開して求める。
- 従って、ノード内の「スムーズな」出力分布は、近代ノード法で計算された中性子束分布より求めることができる。
- このスムーズな出力分布に集合体計算で得られた燃料棒ごとの出力分布を乗じることで、炉心内における燃料棒単位の出力分布を求めることができる。



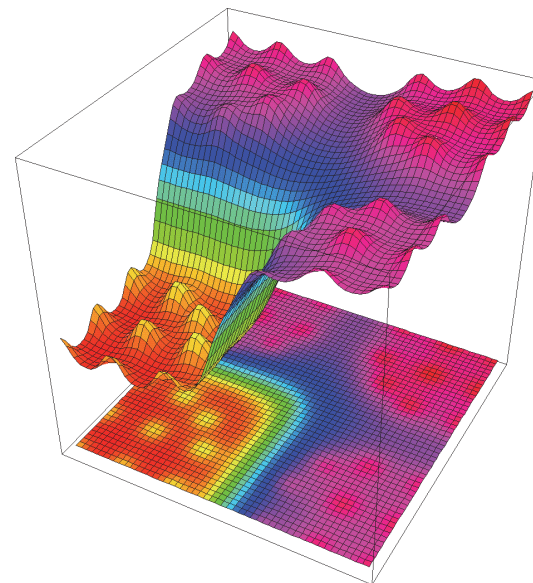
# ノード内の二次元中性子束分布

- 近代ノード法で求められるのは、X, Y, Zそれぞれの方向の一次元中性子束分布
- 一方、燃料棒単位の出力量計算に必要なのは、X-Y二次元での中性子束分布
- 一次元中性子束分布から二次元中性子束分布を計算するもっとも簡単な方法は

$$\phi(x, y) = \phi_x(x)\phi_y(y)$$

# ノード内の二次元中性子束分布

- X方向とY方向の単なる掛け合わせは、集合体内で中性子束分布がX, Y方向に分離できると仮定していることである。
- しかし、この仮定では集合体内の中性子束分布を精度よく表すことができない。





# ノード内の二次元中性子束分布

- そこで、ノード内の二次元中性子束分布を単なる掛け合わせではなく、例えば以下のようにX, Yが変数分離できない関数で表すことを考える。

一群

$$\phi_1(x, y) = a_{4,0}x^4 + a_{3,0}x^3 + a_{2,0}x^2 + a_{1,0}x$$

$$+ a_{0,4}y^4 + a_{0,3}y^3 + a_{0,2}y^2 + a_{0,1}y$$

$$+ a_{2,1}x^2y + a_{1,2}xy^2 + a_{1,1}x^2y^2 + a_{1,1}xy$$

$$+ a_{0,0} \quad x, y \text{ について、3乗以上のcross termを無視}$$



# ノード内の二次元中性子束分布

## 二群

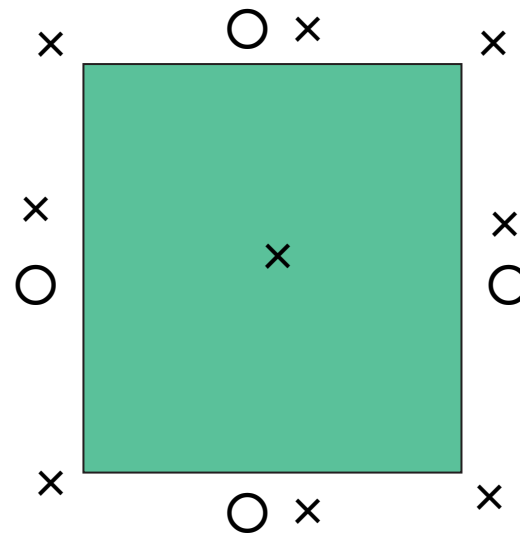
$$\begin{aligned}\phi_2(x, y) = & c_{0,0} \phi_1(x, y) \\ & + c_{1,0} \sinh(\kappa x) + c_{2,0} \cosh(\kappa x) + c_{3,0} \sinh(2\kappa x) + c_{4,0} \cosh(2\kappa x) \\ & + c_{0,1} \sinh(\kappa y) + c_{0,2} \cosh(\kappa y) + c_{0,3} \sinh(2\kappa y) + c_{0,4} \cosh(2\kappa y) \\ & + c_{2,1} \cosh(\kappa x) \sinh(\kappa y) + c_{1,2} \sinh(\kappa x) \cosh(\kappa y) \\ & + c_{2,2} \cosh(\kappa x) \cosh(\kappa y) + c_{1,1} \sinh(\kappa x) \sinh(\kappa y)\end{aligned}$$

$x, y$ について、 $2\kappa x, 2\kappa y$ を含むcross termを無視

$$\kappa = \sqrt{\frac{\Sigma_a}{D}}$$

# ノード内の二次元中性子束分布

- 先ほどの関数には群毎に未知数が13個ある。これを以下の場所における中性子束( $\times$ 、9個)および中性子流( $\circ$ 、4個)でフィッティングする。







# ノード内の二次元中性子束分布

- ノード平均中性子束、ノード表面中性子束、ノード表面中性子流は、近代ノード法の計算結果をそのまま利用することができる。
- 一方、コーナー部における中性子束は近代ノード法では評価しておらず、何らかの方法で求める必要がある。
- 最も簡単な方法は以下の式から求めることである。しかし、このままでは精度が悪い問題点がある。

$$\phi(x, y) = \phi_x(x)\phi_y(y)$$

# ノード内の二次元中性子束分布

- そこで、隣接する4ノードにおいてそれぞれコーナ一部分の均質体系の中性子束を先ほどの式で推定し、コーナ一点でのform factor (FF) を乗じた上でそれらの平均をとる。

$$\phi_{corner}^{het} = \frac{1}{4} \left( FF^1 \phi_{corner}^{hom,1} + FF^2 \phi_{corner}^{hom,2} + FF^3 \phi_{corner}^{hom,3} + FF^4 \phi_{corner}^{hom,4} \right)$$

- Form factorは、非均質中性子束/均質中性子束で定義され、単一集合体計算で求められる。
- その後、非均質体系のコーナ中性子束を改めてform factorで割り、均質体系のコーナ中性子束を再評価する。

$\phi_{corner}^{hom,2}$	$\phi_{corner}^{hom,1}$
$\phi_{corner}^{hom,3}$	$\phi_{corner}^{hom,4}$



# ノード内の核分裂断面積分布の評価

- ノード内のスムーズな出力分布を求めるためには、ノード内の核分裂率分布を評価する必要がある。このために、ノード内の核分裂断面積分布を求める必要がある。
- ノード内の核分裂断面積分布は、主としてノード内の燃焼度の傾き、副次的な効果としてとスペクトル履歴効果、スペクトル干渉効果により発生する。
- 従って、ノード内の燃焼度分布をX方向、Y方向それぞれ二次式でフィッティングし、それらを掛け合わせることでノード内の燃焼度分布を求める。(中性子束の展開よりかなり簡易な方法)
- 二次式のフィッティングのため、ノード平均(1個)およびノード表面(2個)の燃焼度が必要となる。
- そのため、炉心計算コードでは、ノード平均の燃焼度に加え、ノード表面の燃焼度も評価している(X+, X-, Y+, Y-)



## 燃料棒単位の出力分布評価

- ノード内のスムーズな中性子束分布および核分裂断面積を用いて、各燃料セル内で核分裂率(実際には発生熱量)の積分を行い、「スムーズな出力分布」を求める。

$$\int \kappa \Sigma_f(x, y) \phi(x, y) dx dy$$

- スムーズな出力分布に集合体計算で得られた燃料棒出力を乗じる。
- 集合体出力が近代ノード法の計算値と一致するように燃料棒出力を規格化する。



# 燃料棒単位の燃焼度評価

- 燃料棒単位の燃焼度を、燃料棒出力再構成と同じ方法を用いて求めることは、原理的に可能である。
- しかし、精度があまりよくない。
- 一般には燃料棒出力再構成により求められた燃料棒単位の出力分布を用いて燃料ピンごとに燃焼度を積算し、燃料棒単位の燃焼度を計算する。
- なお、燃料棒単位の燃焼度は以下の観点から必要となる場合がある。
  - 燃料棒の最高燃焼度制限値
  - 燃料棒の機械的健全性評価



# 燃料棒出力再構成の計算例

---

- B&W臨界実験

K. Rempe, et al., *Nucl. Sci. Eng.* **103**, 334 (1989).



# 燃料棒出力再構成の限界

- 燃料棒出力再構成の誤差は、以下の点から発生する。
  - 近代ノード法自体の誤差
  - コーナ一点における中性子束の推定誤差
  - 二次元中性子束分布のフィッティング誤差
  - 核分裂断面積のフィッティング誤差
- 様々な工学的な計算モデルの採用により、現行の軽水炉に対しては、おおむね満足できる精度が得られている。
- しかし、新型炉に対しては、上記の誤差要因について慎重に検討する必要がある。



# まとめ

---

- 燃料棒出力再構成法
  - 中性子束のフィッティング
  - コーナー中性子束の推定
  - 核分裂断面積のフィッティング
  - 燃料棒単位の出力分布再構成
- 燃料棒単位の燃焼度分布評価
- 燃料棒出力再構成法の限界