

物質表面への熱負荷の計測手法

自然科学研究機構

核融合科学研究所・研究部 構
造形成・持続性ユニット

教授 長壁 正樹

2025年1月21日

従来技術とその問題点

既に実用化されている物質表面の熱負荷評価法には、長壁による「物体の熱負荷計測方法」※等があるが、

- 1つの計測箇所に対して、最低2点以上の計測信号が必要
- 計測素子として熱伝導の悪い素材を用いた時には、得られる信号がオーバーシュート・アンダーシュートする

等の問題があり、広く利用されるまでには至っていない。

※特許2990279

従来技術の原理

- 表面から異なる距離の2点(A点及びB点)の温度の時間変化を計測し、下式に基づき、表面の熱負荷の時間変化を評価

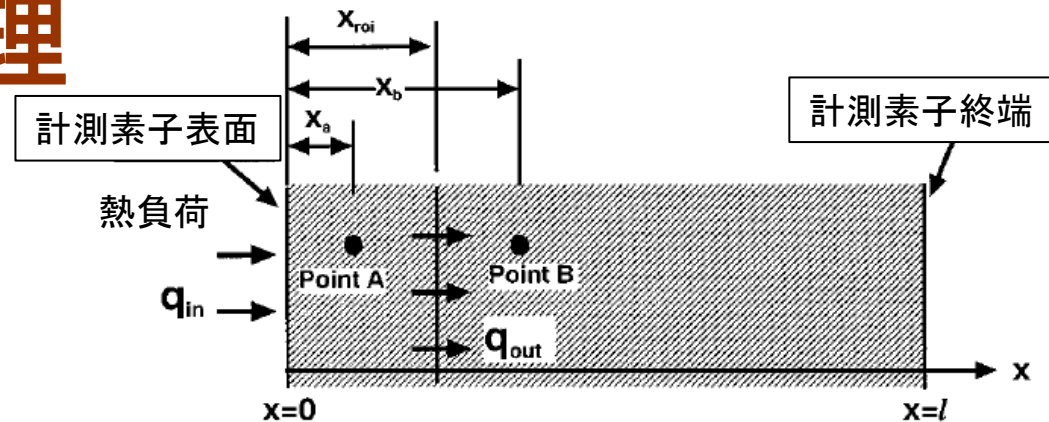
$$q_{in} = q_{out} + C_p \rho \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{x_{roi}} T(x) dx$$

$$\approx \underbrace{-\kappa \frac{T_b - T_a}{x_b - x_a}}_{\text{空間差分項}} + \underbrace{C_p \rho \left(\frac{x_b + x_a}{2} \right) \frac{\partial T_a}{\partial t}}_{\text{時間微分項}}$$

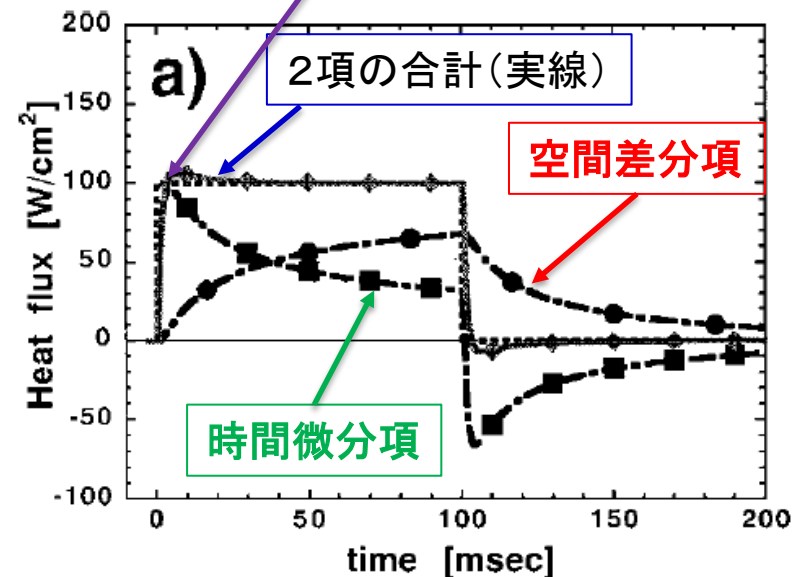
空間差分項

時間微分項

- 表面から異なる距離の2点(A点及びB点)の温度の時間変化を計測し、下式に基づき、表面の熱負荷の時間変化を計測



熱拡散計算で仮定した入熱波形(点線)



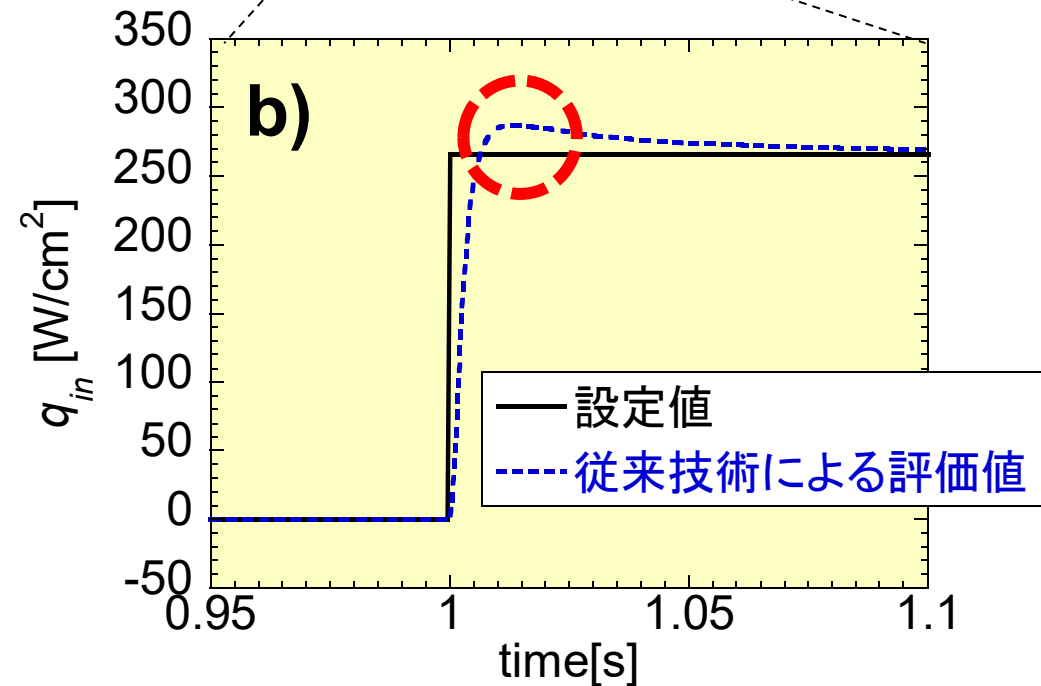
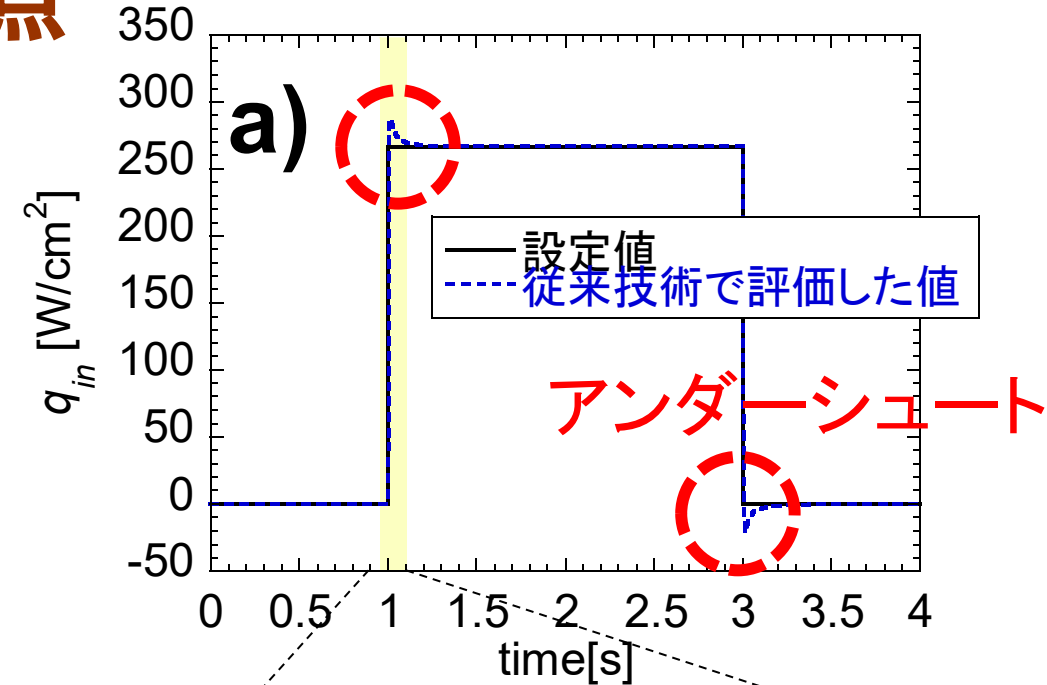
従来手法の原理検証の結果
(計測素子として無酸素銅の使用を想定)

[1] M.Osakabe *et al.*, Rev. Sci Instrum. **72**(2001)586

従来技術の問題点

- 1カ所の熱負荷計測を行うために、2点以上の計測点を必要とする。
- 計測素子として用いる物質の熱伝導度が低い場合(右図はモリブデンを想定)は、得られる信号にオーバーシュートやアンダーシュートが現れる。

オーバーシュート



新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来技術の問題点であった、複数の計測信号を必要とする点を改良し、一つの計測信号から熱負荷を評価できる手法を開発することに成功した。
- 従来技術は、熱伝導率が低いものを対象とする場合には、評価された熱負荷信号にオーバーシュートやアンダーシュートなどが発生するといった問題があったが、熱伝導を考慮した評価を行うことでこの問題を大幅に解消した。

新技術の原理※

従来法を改善し、一つの温度計測点における温度変化を再現するような入力熱負荷($q_{in}^{eval}(t)$)を評価する手法を確立。

- ① 入力熱負荷のイニシャルゲス($q_{in}^{guess-1st}(t)(= q^{guess}(0, t))$)を与えて、計測点Aにおける温度変化を熱輸送方程式を解いて計算する。

$$\left. \begin{aligned} & q^{guess}(x, t) = -\kappa \frac{\partial}{\partial x} T^{guess}(x, t), \\ & \frac{\partial}{\partial t} T^{guess}(x, t) = -\frac{1}{c_p \rho_m} \frac{\partial}{\partial x} q^{guess}(x, t) \end{aligned} \right\} \text{---(1)}$$

- ② 計測された温度とイニシャルゲスを用いて計算された温度の差分($\delta T(t_i) = T^{meas.}(t_i) - T^{guess.}(t_i)$)より、入力熱負荷の補正項($\delta q(t_i)$)を評価。

$$\delta q(t_i) = \alpha c_p \rho_m \delta T(t_i) \frac{\Delta t}{\Delta x} \text{---(2)}$$

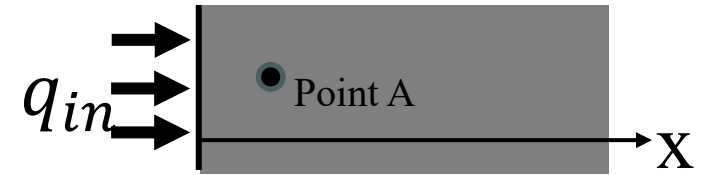
ここで、 α は調整パラメータ。 Δt 及び Δx は熱輸送方程式を差分法で計算する際のステップ時間及びステップ長。

- ③ 計測体系表面にて与えられた熱負荷が、計測点の温度変化に影響を与える際には**時間遅れ**(t_{delay})があると考え、その遅れ時間分だけ遡って入力熱負荷に補正を与える。

$$q_{in}^{guess-2nd}(t_i - t_{delay}) = q_{in}^{guess-1st}(t_i - t_{delay}) + \delta q(t_i) \text{---(3)}$$

- ④ (3)式で示される入力熱負荷を基に、 $t = t_i - t_{delay}$ から t_i までの再計算を行う。
 $|\delta T(t_i)| < \epsilon$ (ϵ : 収束判定条件)となったら、

- ⑤ $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ として、①~④の計算を $t = t_{i+1}$ まで実行。



$x=0$
図1 熱負荷評価体系

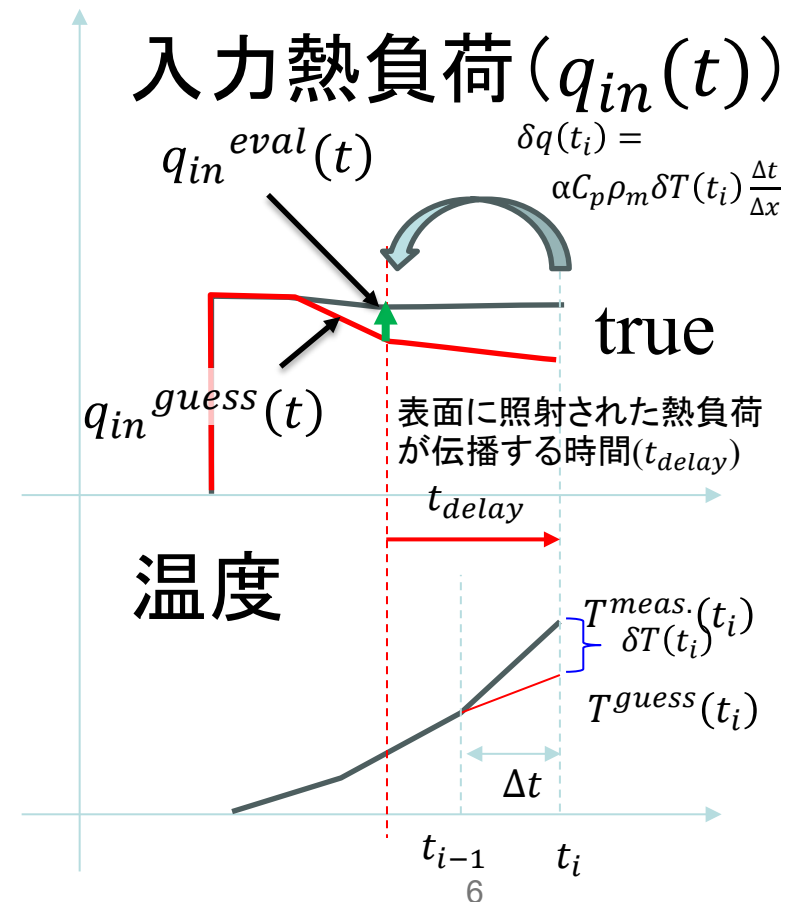
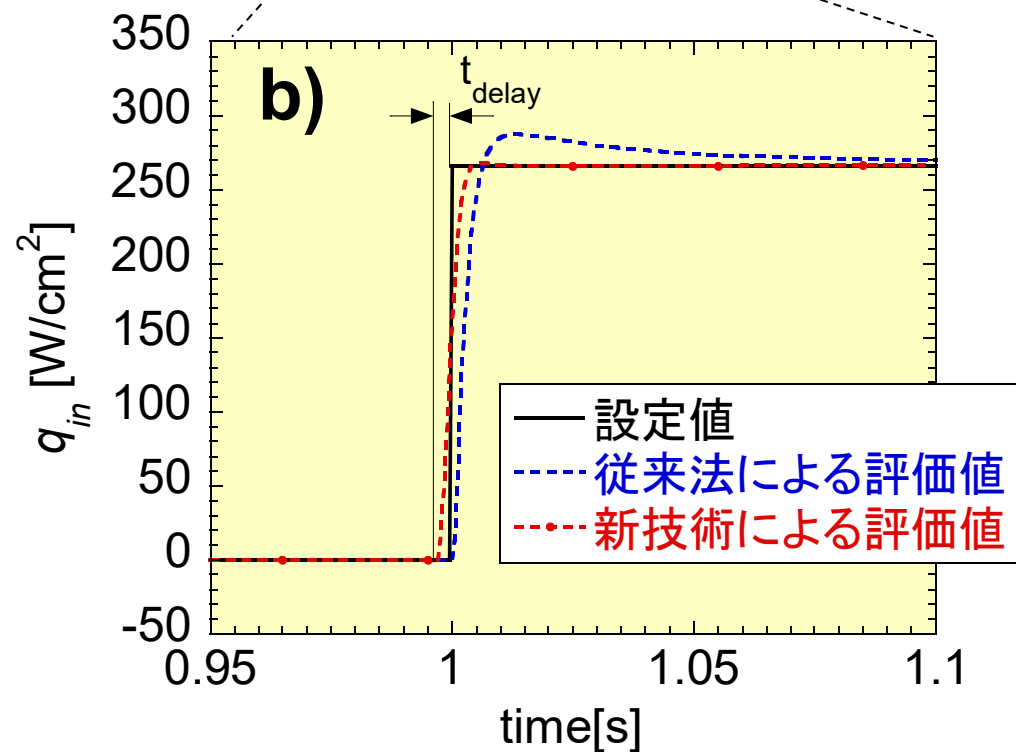
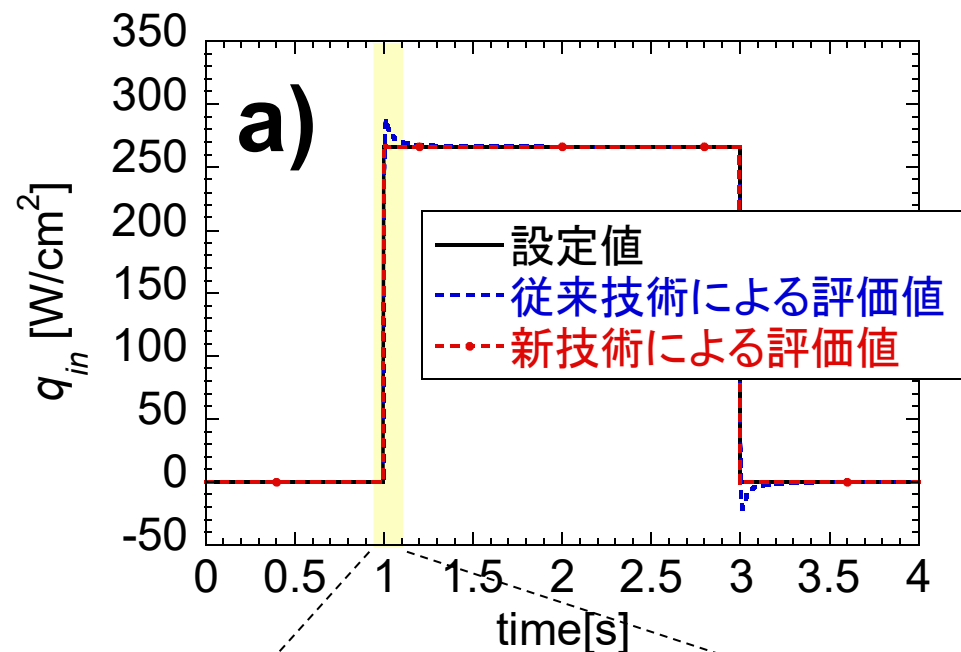


図2 本発明による熱負荷評価手法

※ 特許 第7504526号

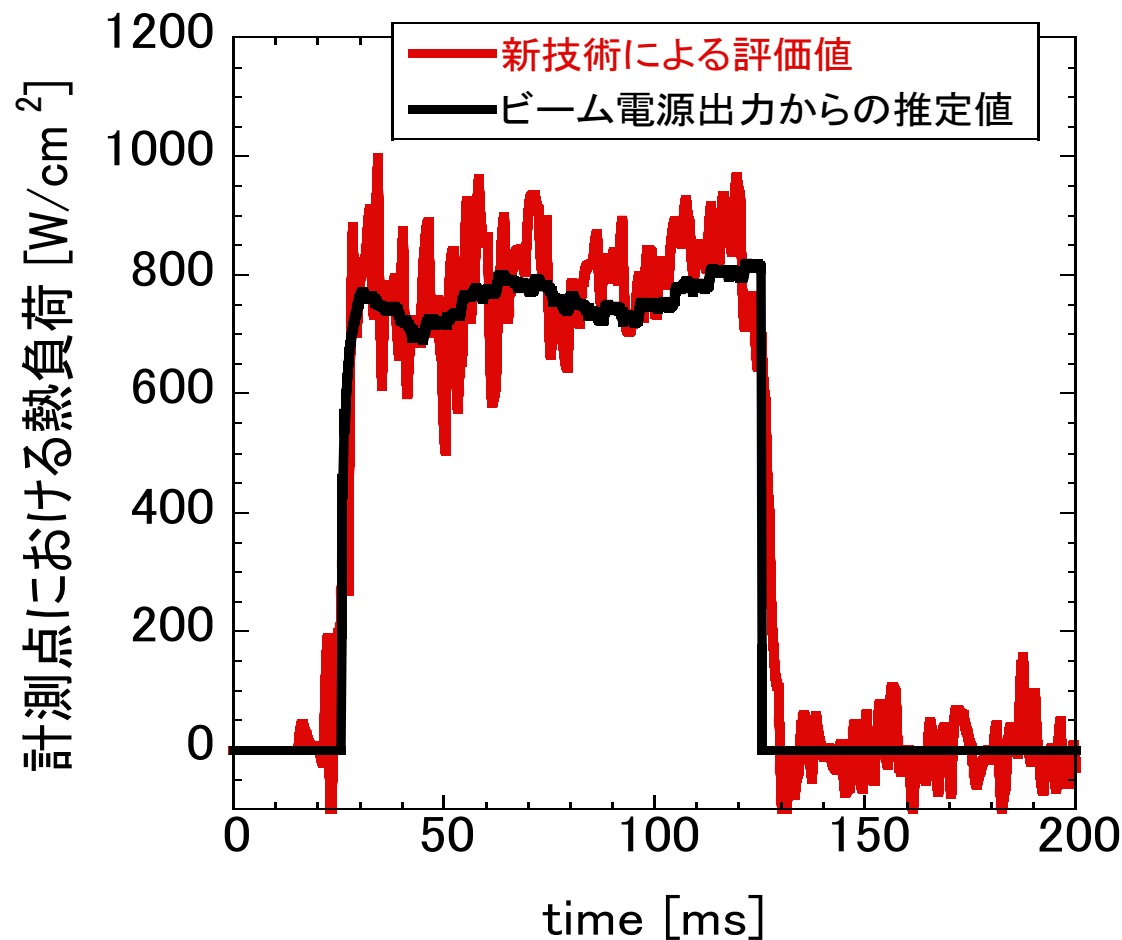
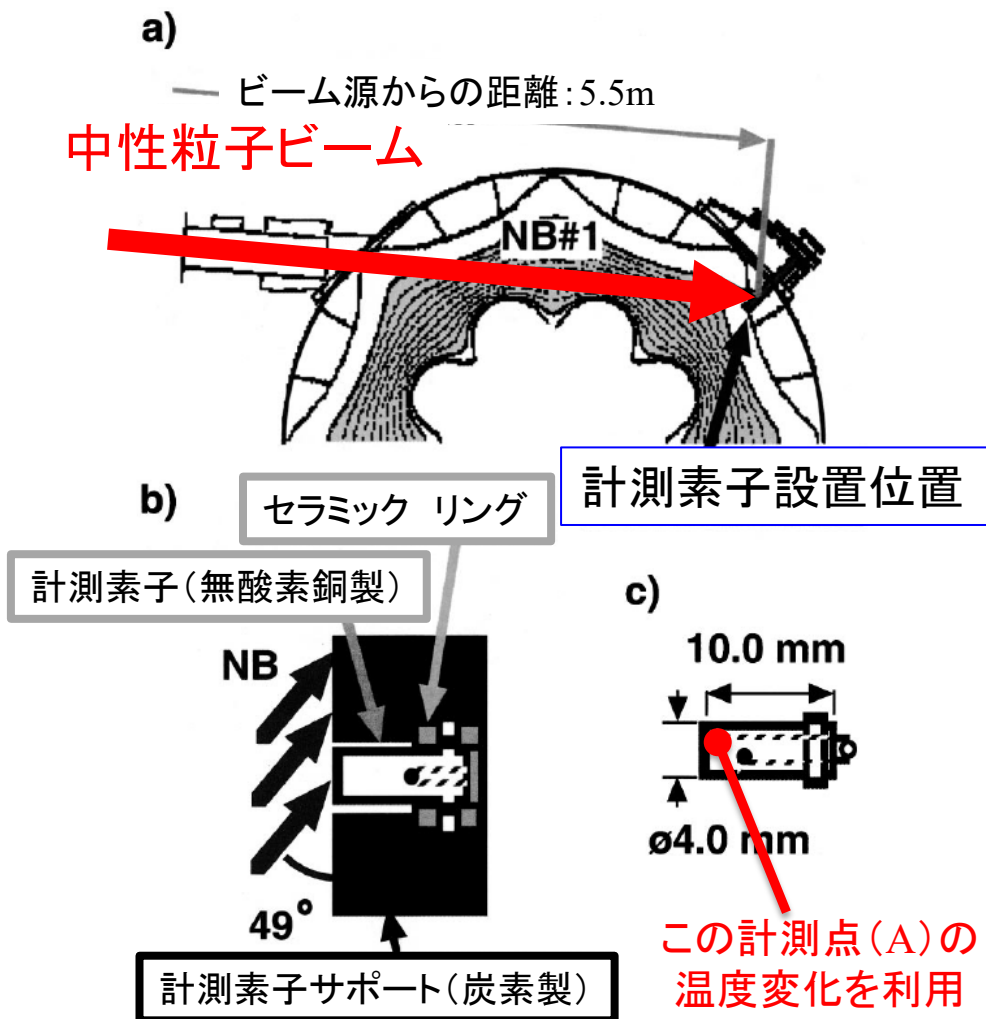
新技術の特徴、 従来技術との比較

- 1つの温度計測信号で熱負荷の評価が可能
- 熱伝導が比較的小さい材質(右図はモリブデンを想定)における信号のオーバーシュート・アンダーシュートを克服
- 信号の立ち上がりは、評価の際に設定した遅れ時間(t_{delay})分だけ早くなる。(この遅れ時間が計測の時間分解能に対応。また、信号の立ち上がりが半値に到達したところが実際の熱負荷の立ち上がりに対応)



実験データに基づく新技術の検証

プラズマを加熱するための中性粒子ビーム(NB)を熱負荷として用いて動作検証を行った。(2000年に従来技術の検証を行った際に用いた実験データを使用)



- ◆ 新技術による評価値は電源出力からの推定値を良く再現
- ◆ 温度計測際にノイズ(主として交流ノイズ)が混入して、計測精度を劣化。その除去が課題

想定される用途

- 本技術は、赤外カメラなどによって直接見込むことが出来ない領域での熱負荷評価が可能。このため、熱源や装置の都合により、そのような視野を取ることが出来ない核融合装置や加速器の受熱部での使用を想定して開発。
- この他に、液体熱源が接触する**るつぼ**や**溶鉱炉**、**内燃機関**の内表面における熱負荷評価や、飛行機・人工衛星などの**飛翔体表面**や**船舶の底面**における熱負荷評価への適用が考えられる。
- 本手法は熱負荷の評価を行っているため、なんらかの装置の運用に必要な**熱源の条件出し**などにも利用できることが期待される。

実用化に向けた課題

- 現在、過去の実験データを用いた原理検証は実施済み。しかし、温度計測上に現れる電気ノイズ（ACノイズ）の除去が課題である。
 - ✓ 電気ノイズについては、ノイズモニター用の計測点を1点追加することで、その影響の除去が可能と思われる。
- 実用化に向けて、熱負荷の評価精度を数%程度以内にする手法を確立する必要あり。
- 実時間計測に向けて、「新技術の原理」で示した手法に対して、高速演算（数十ms）を実施するアルゴリズムの確立も必要。

企業への貢献、PRポイント

- 本技術は直接見込むことが出来ない隠れた領域での熱負荷の評価が可能のため、るつぼや溶鋳炉内面の熱負荷評価や移動体表面の熱負荷評価を行いたい企業に貢献できると考えている。
- 本技術の導入にあたり必要なノイズ除去に関する追加実験や適応対象となる体系の事前評価を行うことでより精度の高い評価が可能。
- 本格導入にあたっての技術指導等

企業への期待

- 電気ノイズの除去については、電気ノイズを直接計測するにより克服できると考えている。
- 高速で移動する物体の開発をされている企業、結晶生成のためのるつぼの運転条件出しの検討されている企業には、本技術の導入が有効と思われる。
- 時間変化する熱負荷の評価を希望する、企業との共同研究を希望。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 熱負荷評価方法及び
熱負荷評価装置
- 特許番号 : 第7504526号
- 出願人 : 大学共同利用機関法人
自然科学研究機構
- 発明者 : 長壁 正樹

お問い合わせ先

自然科学研究機構事務局研究協力課

TEL 03-5425-1325

FAX 03-5425-2049

e-mail nins-sangaku@nins.jp