

平坦性のパラドックス

完璧に制御された「反り」が、いかにして
究極の平坦性を持つ回路基板を生み出すか

性能への飽くなき要求が、 基板技術の限界を押し上げる

電気自動車（EV）、新幹線、データセンター、産業用インバーター。パワーエレクトロニクスの世界では、高密度化、高信頼性、そして優れた放熱性が絶えず求められています。

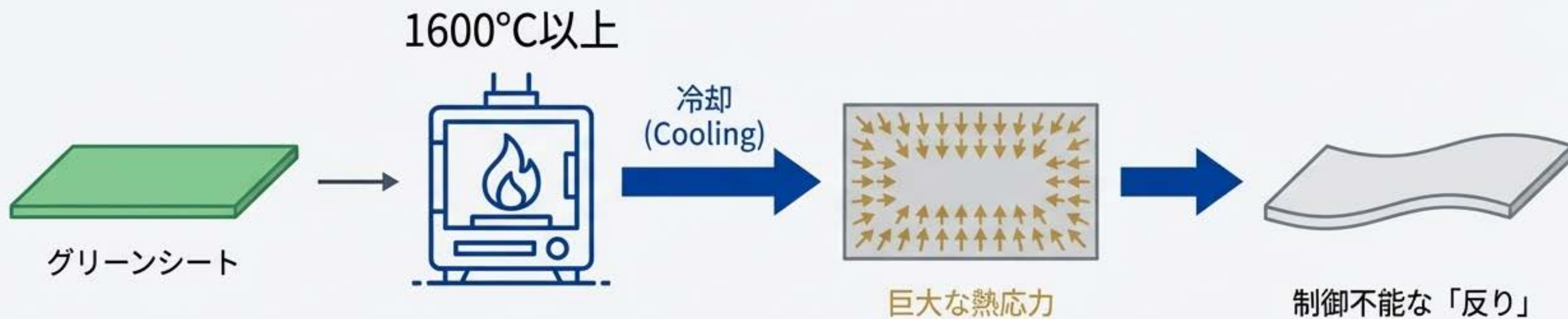
すべての性能は、その土台となる回路基板の品質から始まります。

特に、基板の「平坦性」は、製造歩留まりと長期信頼性を左右する最も重要な要素の一つです。



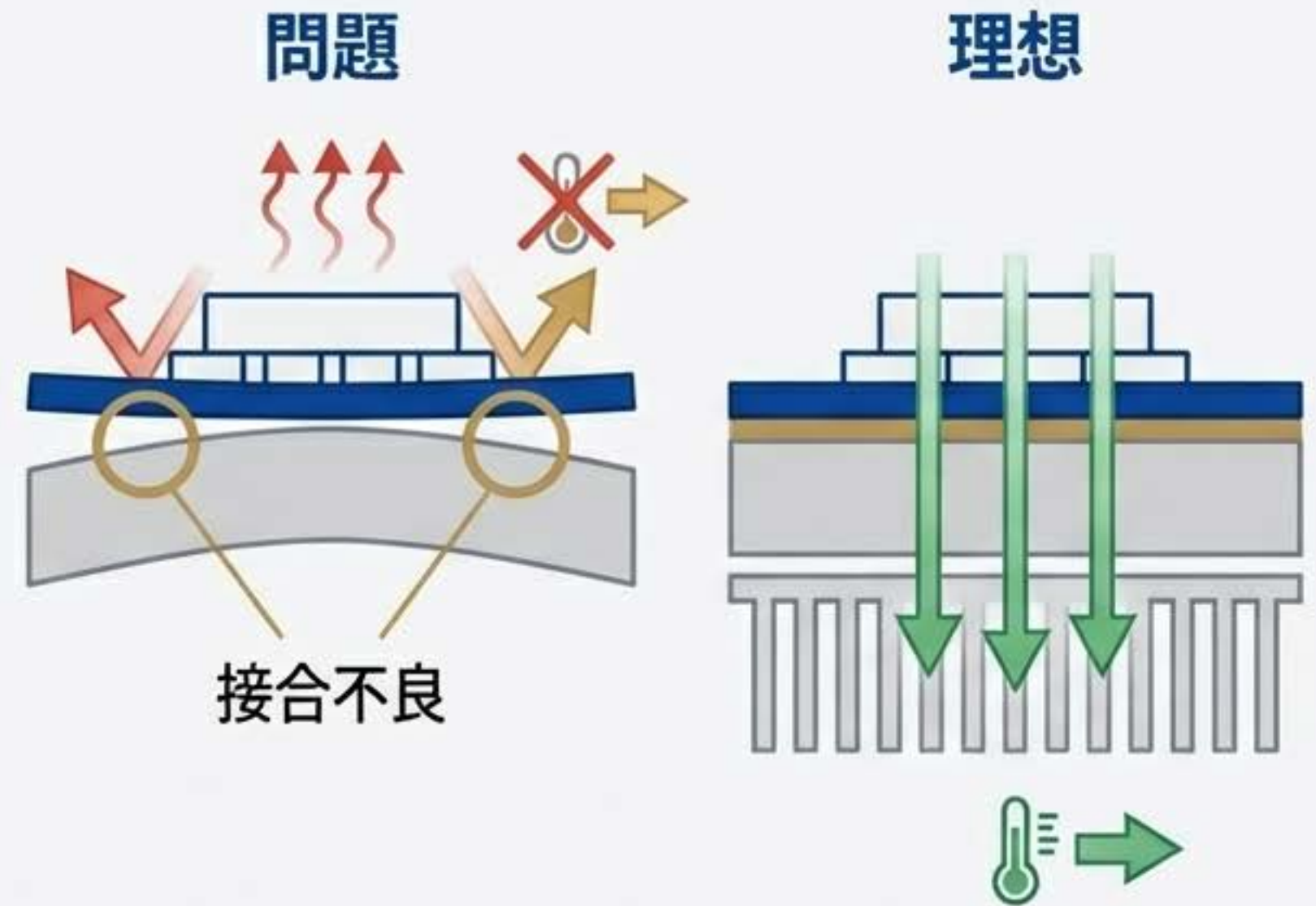
根本的な課題：高温焼結プロセスが生む熱応力と「反り」

窒化珪素（ Si_3N_4 ）などの高性能セラミックスは、 1600°C を超える高温で焼結されます。このプロセスは優れた機械的・熱的特性を実現する上で不可欠ですが、冷却過程で基板内部に巨大な熱応力が発生します。この応力が不均一に解放されることで、基板に「反り（Warping）」が生じます。これは、製造プロセスに内在する物理的な課題です。

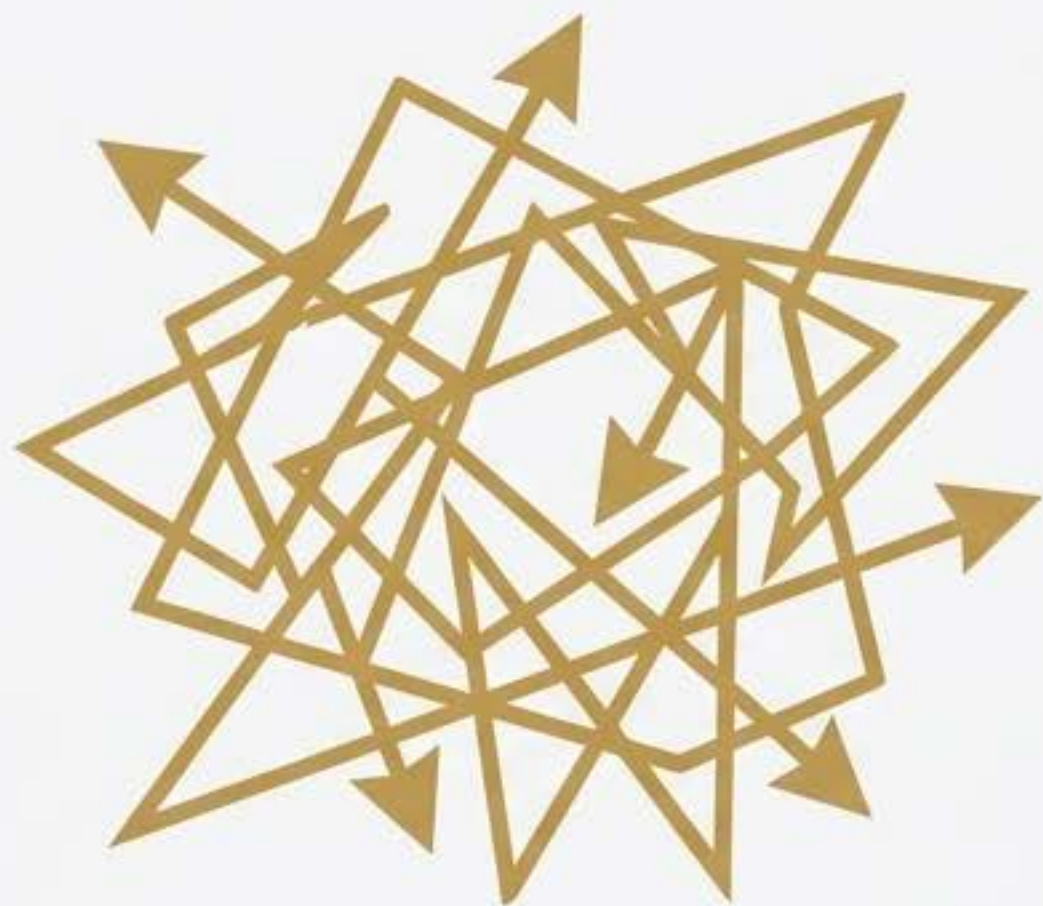


制御不能な「反り」が引き起こす致命的な欠陥

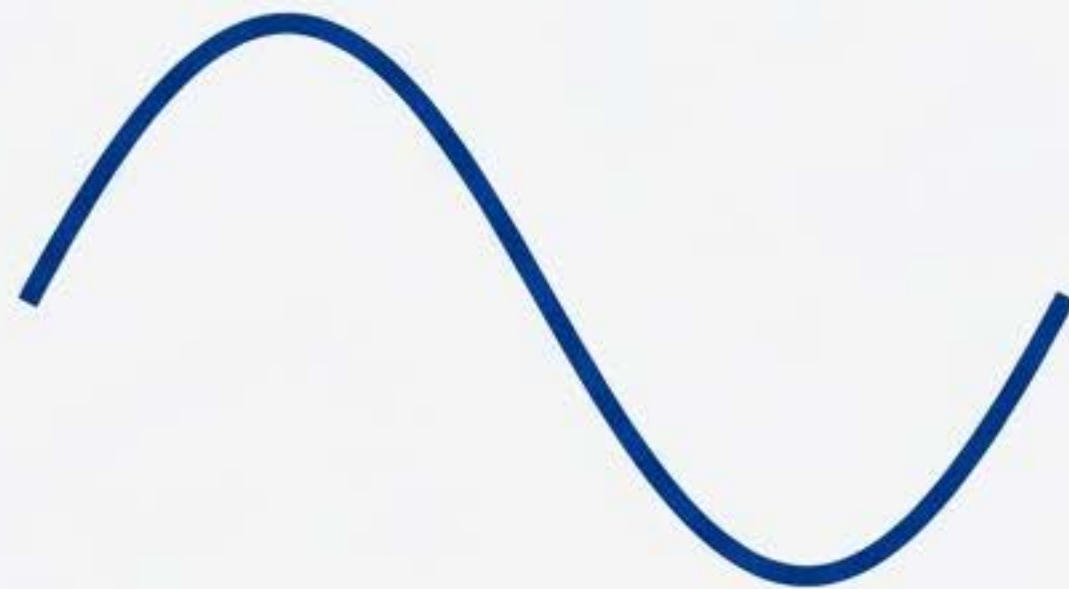
- **接合不良**：金属層との間に隙間が生じ、接合強度が低下。部分的な剥離（デラミネーション）の原因となる。
- **放熱性能の低下**：パワー半導体との間に熱抵抗が増大し、冷却効率が悪化。デバイスの性能を最大限に引き出せない。
- **製造歩留まりの悪化**：回路パターン形成や部品実装工程でのハンドリングが困難になり、不良率が上昇する。



「反り」をなくすのではなく、 意図的に、精密に、制御する。



制御不能な「反り」
(Uncontrolled Warpage)



意図的に制御された形状
(Intentionally Controlled Shape)

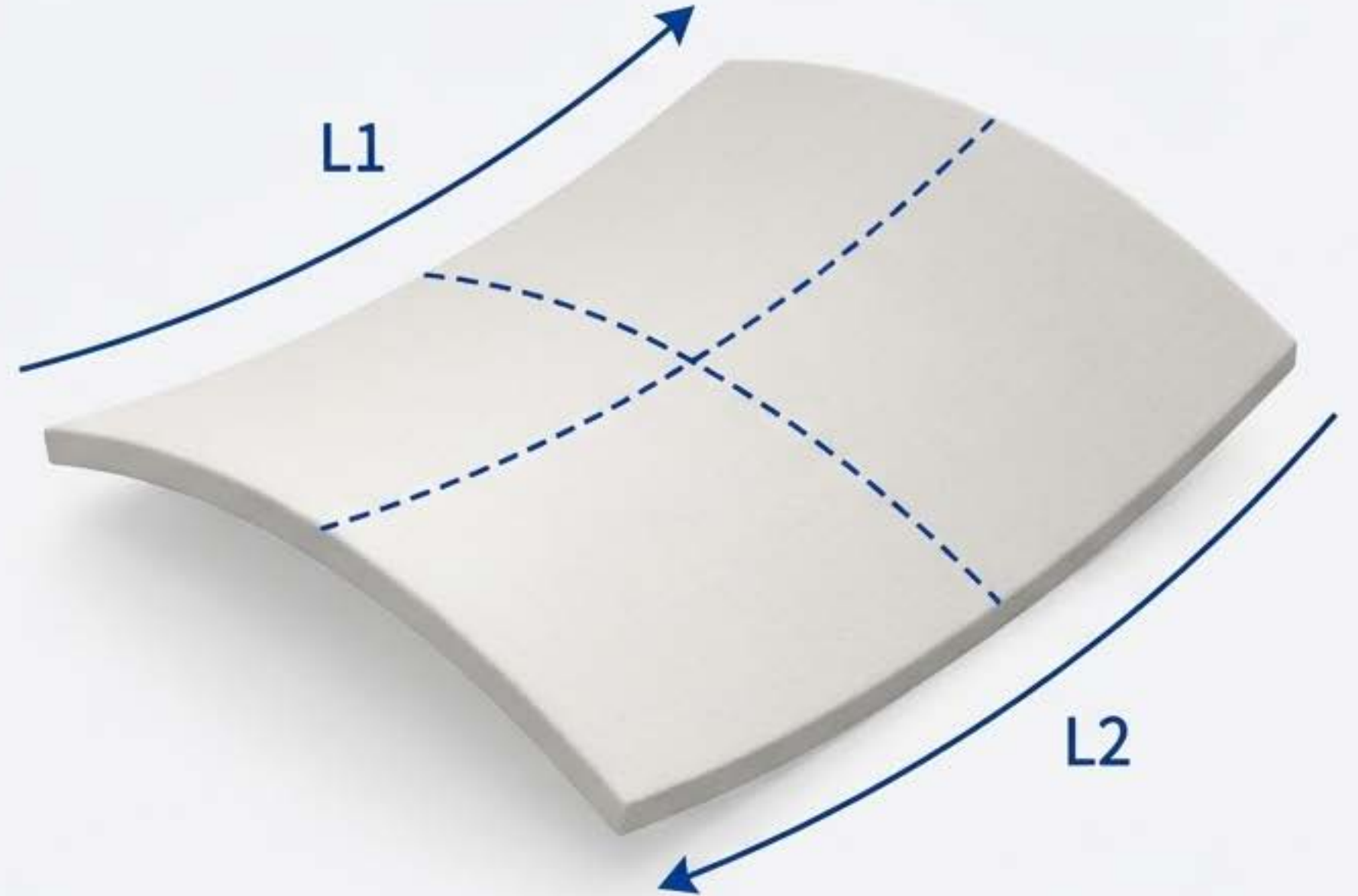
デンカのソリューション： 精密に設計された 「鞍型形状」基板

我々は、完全に平坦な基板を目指すのではなく、予測可能で均一な「鞍型（Saddle Shape）」の立体形状を持つ基板を意図的に製造します。

第1直線 (L1) 断面: 長手方向の中央部分が一方の厚み方向に向けて凸状に湾曲。

第2直線 (L2) 断面: 短手方向の中央部分が他方の厚み方向に向けて凸状に湾曲。

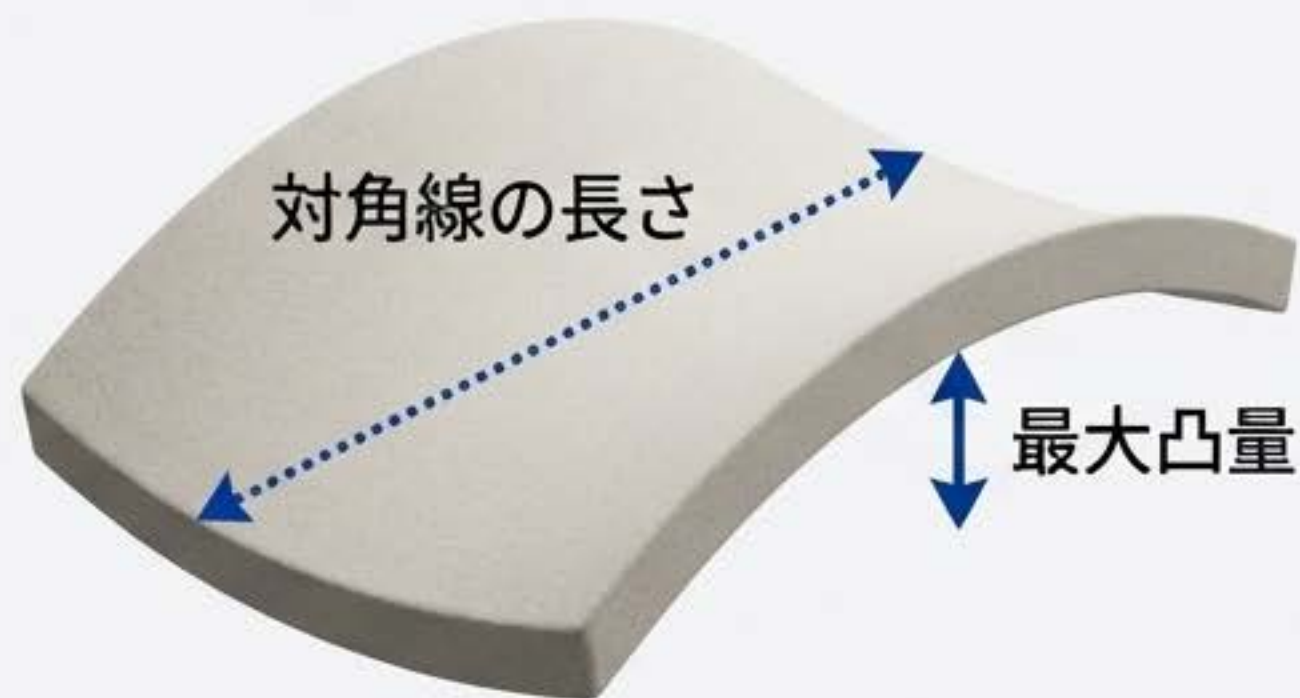
この対称的で連続的な曲面が、後の工程で完璧な平坦性を実現する鍵となります。



完璧な制御を定義する「ゴールデンウィンドウ」

この鞍型形状は、単なる反りではありません。
厳格に定義された特定の範囲内に制御されています。

反り量 = $2\mu\text{m}/\text{mm}$ 以上 $6\mu\text{m}/\text{mm}$ 以下



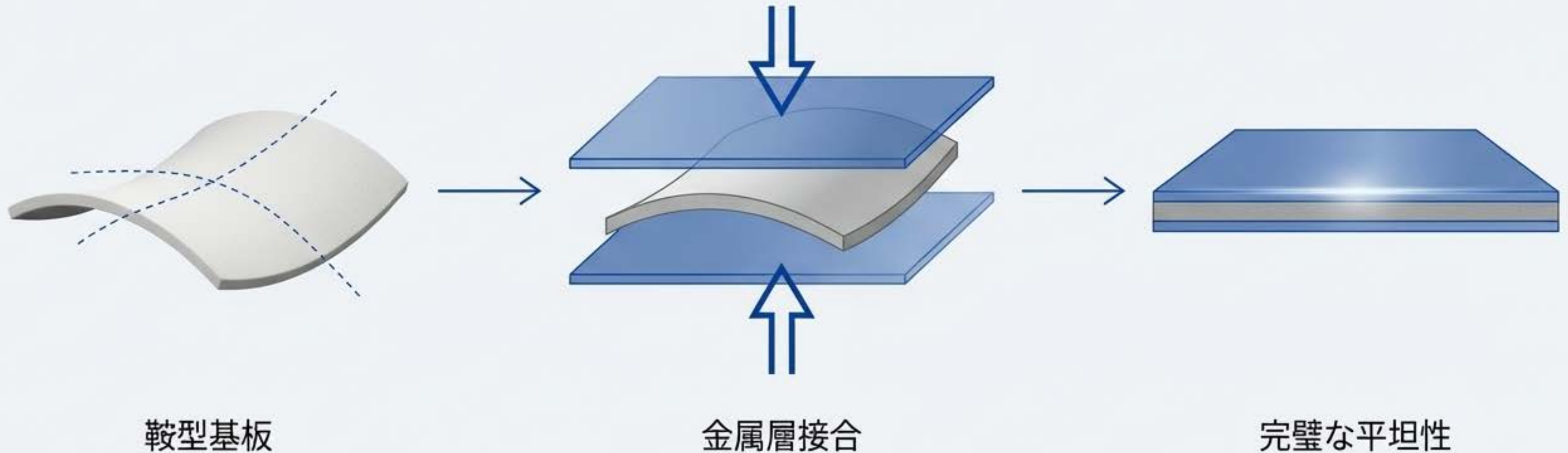
$$\text{反り量} = \frac{\text{最大凸量}}{\text{対角線の長さ}}$$

この「ゴールデンウィンドウ」こそが、金属層との積層時に理想的な平坦性を達成するための必須条件です。（特許請求の範囲 第1項）

最終結果：積層プロセスを経て、理想的な平坦性を実現

鞍型形状の基板は、その予測可能で均一な応力分布により、金属層（銅板など）を両面に接合する際に、外部からの均一な圧力で容易に矯正されます。残留熱応力が効果的に相殺され、結果として得られる複合基板は、従来法では達成困難であった極めて優れた平坦性を示します。

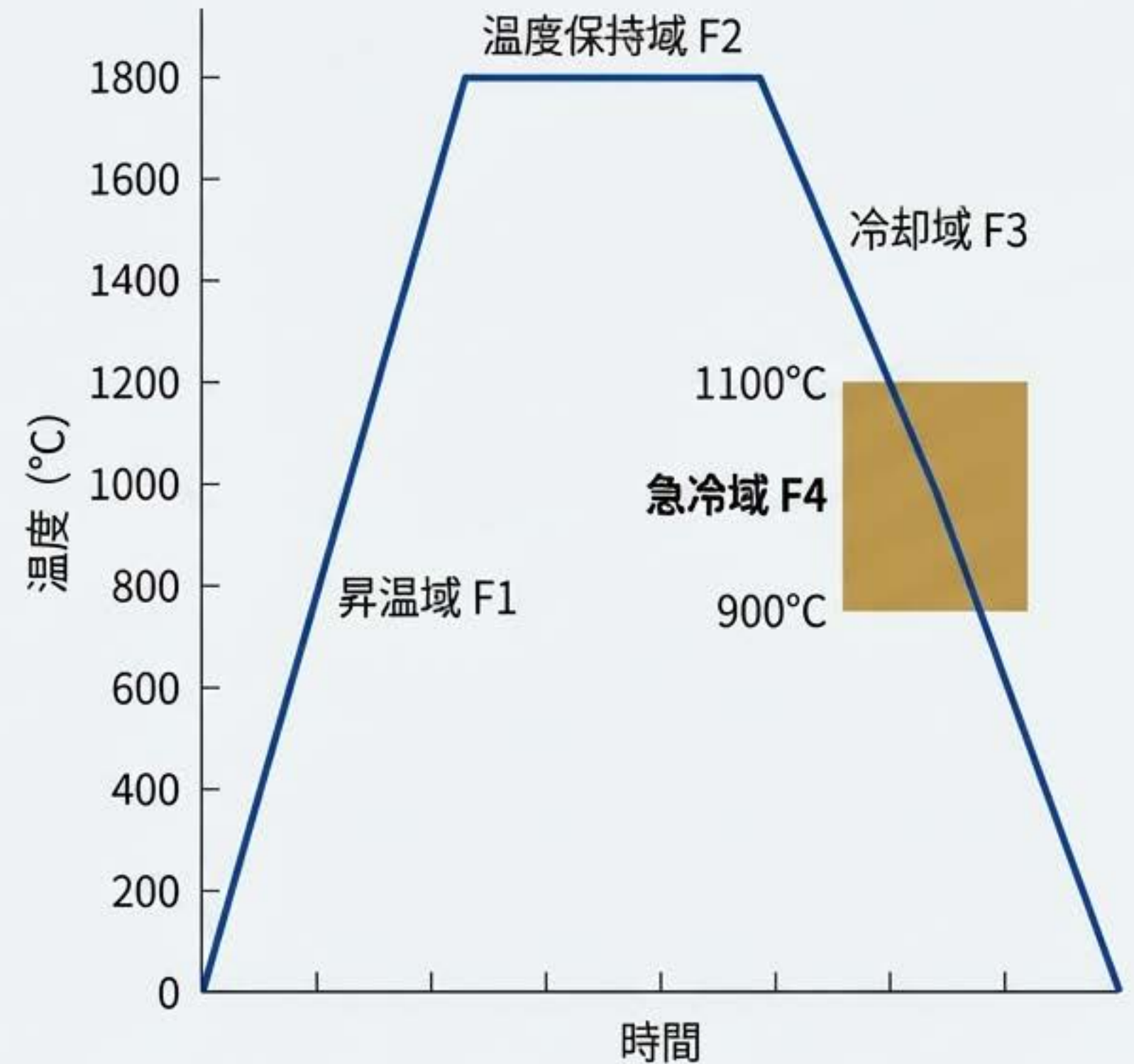
（効果の記述参照：【0096】「鞍状に反ったセラミック基板は…金属板との積層時に容易に矯正され平坦形状となる。」）



製造の核となる技術 ①： 精密な温度制御による応力形成

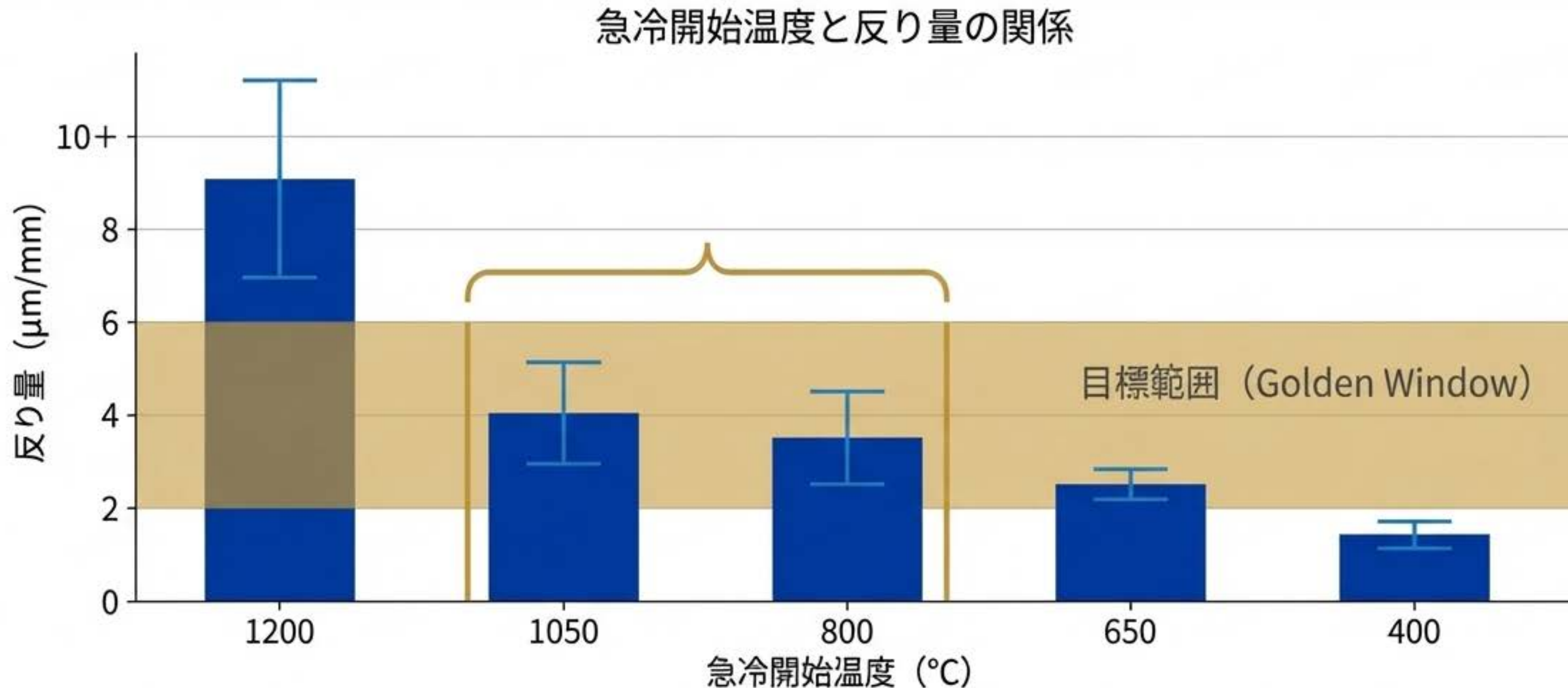
- **焼結**: 1600°C以上で加熱・保持し、セラミックスを緻密化させます。
- **急冷** (Quench Cooling) : 冷却域の途中、特に**900°C~1100°C**の温度帯で冷却速度を意図的に速めます。この急冷により、基板内部に均一で制御された熱応力を閉じ込め、後の鞍型形状の土台を形成します。

(特許請求の範囲 第10項、第15項)



データが示す急冷プロセスの効果

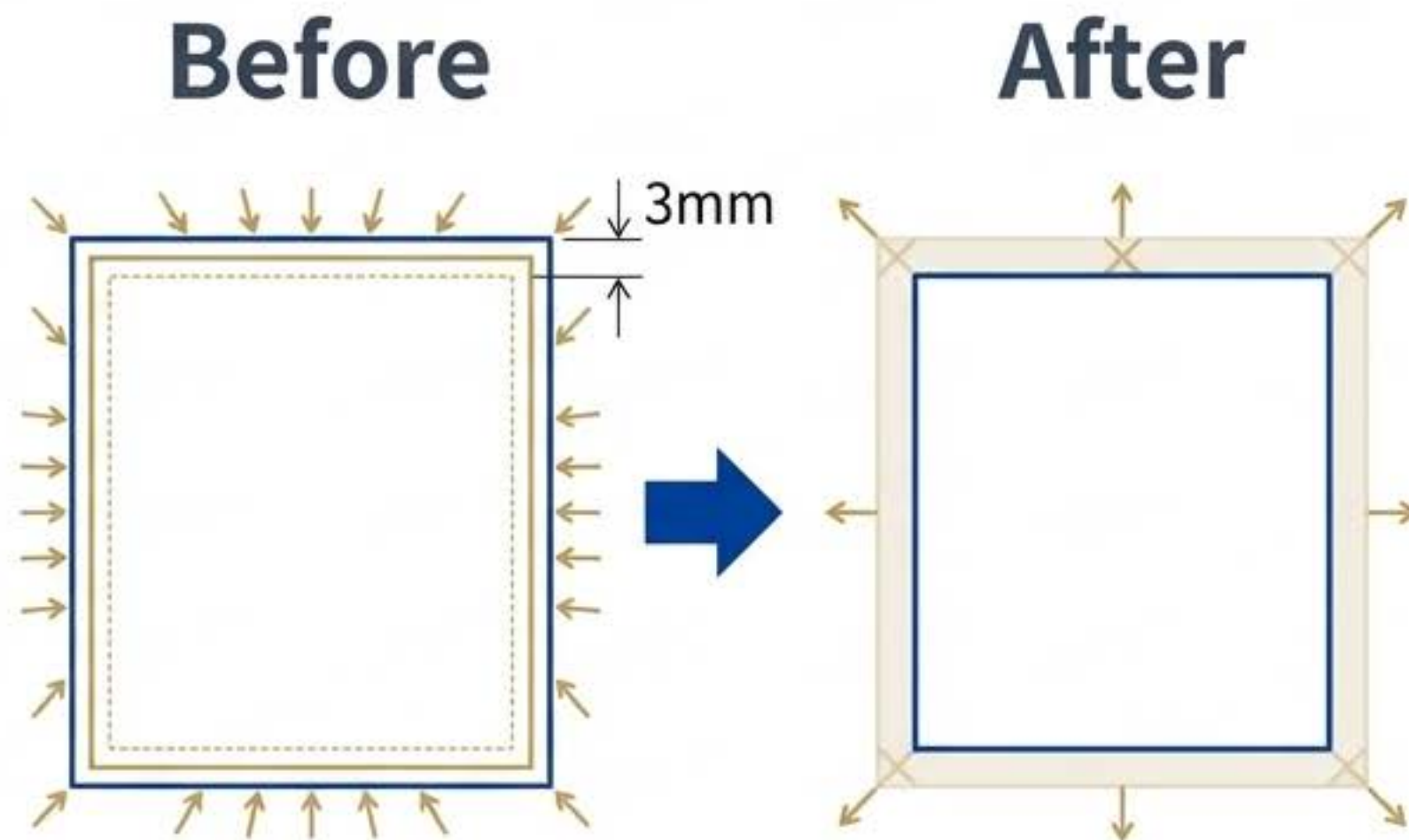
急冷を開始する温度は、最終的な反り量を決定する上で極めて重要です。データによると、急冷開始温度を**900°C~1100°C**の範囲に設定することで、反り量を目標の**2~6 $\mu\text{m}/\text{mm}$** の範囲内に、かつばらつきを抑えて安定安定的に制御できることが実証されています。



製造の核となる技術 ②： 応力解放による形状の最終調整

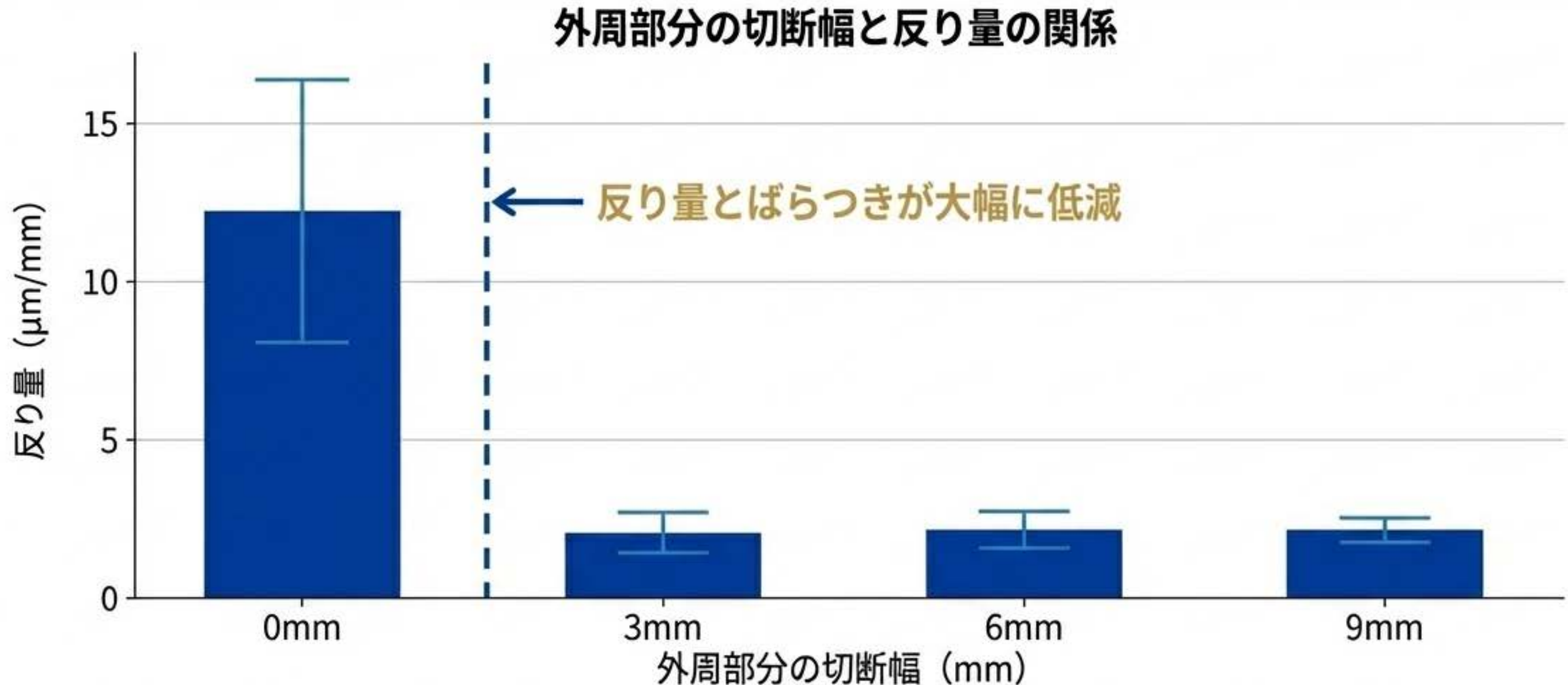
- 外周部分切断（Edge Trimming）：基板の全周縁を、少なくとも幅3mm切り落とします。
- 目的：冷却時に最も応力が集中する外周部分を除去することで、基板全体の残留応力を解放し、より均一で安定した鞍型形状を完成させます。

（特許請求の範囲 第10項、効果の記述参照：【0077】）



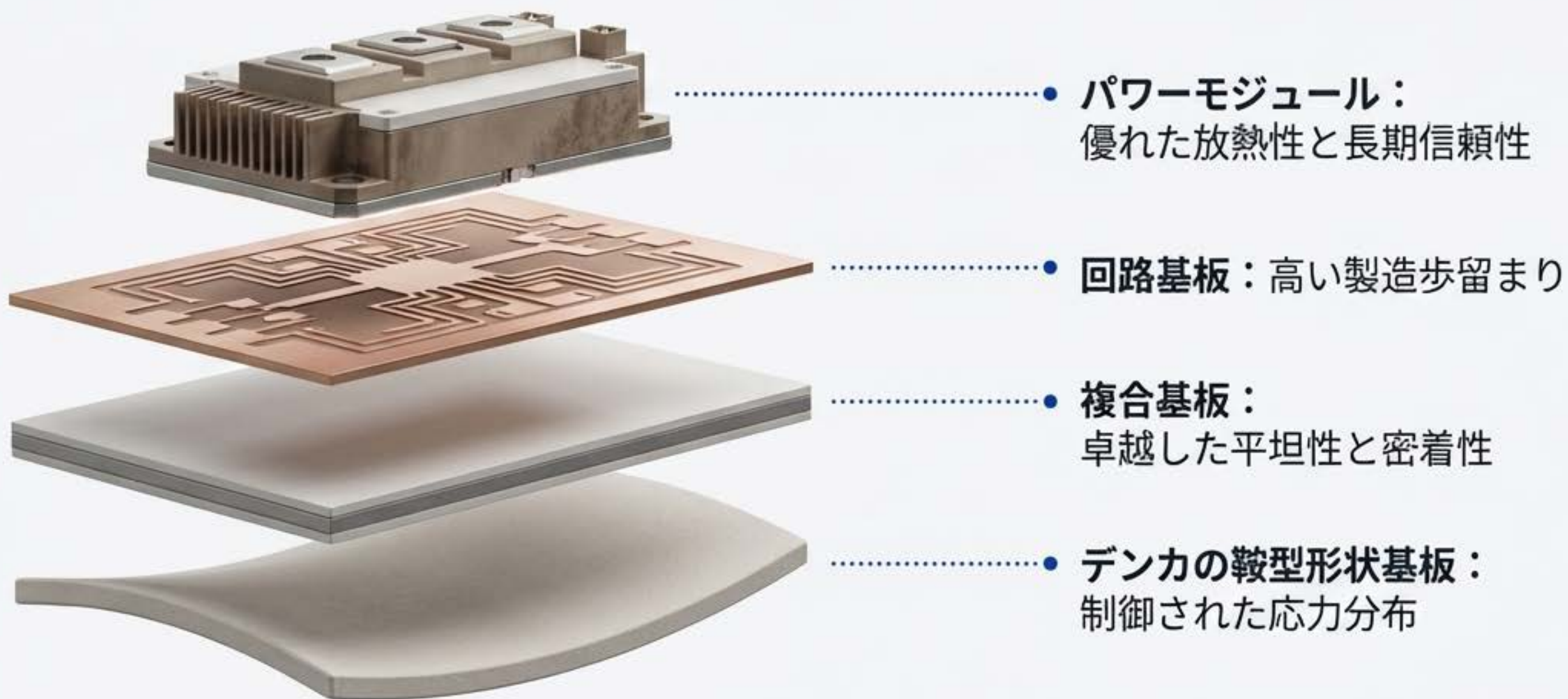
データが証明するエッジトリミングの重要性

外周部分の切断幅は、反り量の低減とその安定化に直接的な効果をもたらします。実験データは、幅3mm以上の切断を行うことで、反り量とそのばらつきが大幅に抑制されることを明確に示しています。これは、より高い品質と製造安定性を保証する上で不可欠な工程です。



優れた基板から、高信頼性システムへ

この革新は、単に優れたセラミック基板を提供するだけではありません。それは、より高性能で、より信頼性が高く、より製造しやすい、パワーモジュールへの道を拓きます。



デンカの革新：サマリー



課題 (Problem) :

高温焼結時の制御不能な「反り」が、パワーモジュールの性能と信頼性を制限していた。



着眼点 (Insight) :

「反り」を敵視するのではなく、味方につける。なくすのではなく、精密に制御する。



解決策 (Solution) :

厳密な仕様 (2-6 μ m/mm) を持つ、予測可能な「鞍型形状」のセラミック基板。



実現技術 (Method) : 「900-1100°Cでの急冷」と

「900-1100°Cでの急冷」と「3mm以上の外周切断」を組み合わせた独自の製造プロセス。



提供価値 (Benefit) : 究極の平坦性を持つ複合基板を実現し、パワーモジュールの性能、信頼性、製造性を飛躍的に向上させる。