

超高压焼結体工具の開発の歴史

History of Super-High Pressure Sintered Cutting Tools

後藤 光宏*
Mitsuhiro Goto

深谷 朋弘
Tomohiro Fukaya

弊社は1970年代後半からダイヤモンド焼結体やCBN焼結体をベースとした切削工具を開発し、世界中に提供してきた。1977年には、焼入鋼切削用CBN焼結体、スミボロン®BN200が開発された。焼入鋼切削は世界初の技術であり、この後、用途を拡大して世界中に広がっていった。1980年代には欠損が問題となる断続切削用の材質、BN250、BN300が開発され、その適用領域を拡大した。1990年代は転削工具への展開が加速し、鋳鉄の超高速加工用フライス工具や、焼入鋼の転削加工を実現するエンドミルが開発された。さらに、2000年代にはPVD法でセラミックス膜を被覆したコーテッドCBN工具が開発され、工具の耐摩耗性や面粗度の安定性が飛躍的に向上し、高精度加工の領域が拡大した。このように、CBN焼結体は今後も材質や工具形状、新加工法の開発が進展し、適用領域を拡大していくことが期待されている。本稿ではこれら工具の開発の歴史について述べる。

Since the late 1970s, Sumitomo Electric Industries, Ltd. has developed cutting tools made from diamond compacts and CBN compacts and sold them all over the world. In 1977, a CBN grade for hard turning, SUMIBORON BN200, was developed. The company also developed hard turning techniques and has applied them to a wide range of products. In the 1980s, new grades, BN250 and BN300, were developed for interrupted cutting, in which the breakage of cutting edges was the main issue. In the 1990s, development of CBN milling tools was accelerated, and high-speed milling cutters for cast iron and endmills for hard milling were developed. In the 2000s, CBN tools with ceramics coating by physical vapor deposition (PVD) were developed and applied to high precision turning. In this way, the application area of CBN cutting tools is expected to be enlarged along with the development of materials, tool forms, and processing technologies. This paper describes the history of these cutting tools.

キーワード：CBN、ダイヤモンド、超高压焼結体、切削工具

1. 緒 言

弊社は粉末冶金技術をベースとした、超硬合金の切削工具を1929年来製造販売してきたが、その歴史の途上で、切削工具として求められる、「より硬く、より耐摩耗性が良い、寿命の長い」工具や「従来では削れないもの（被削材）が削れる」工具、さらには、より「高能率で切削ができる」工具を提供することを目指して、超高压プロセス（＝高压高温プロセス＝HPHTプロセスと以後称する）の開発を行ってきた。その結実として、弊社は1970年代後半からダイヤモンド焼結体やCBN（立方晶窒化ホウ素）焼結体をベースとした切削工具を日本のみならず、世界の自動車業界をはじめとした、多くの加工プロセスを有するお客様に、長年工具を提供し、また、今日に至るまで、その性能を向上させるための材質開発や工具形状開発を行ってきた。本稿では、その材質と工具開発の歴史をCBN焼結体に絞って紹介する。

ロセスで合成される。焼結体に先駆けて、このCBN砥粒を用いて研削砥石等が製品化されていた。CBNは硬度では、ダイヤモンドの劣るものの、その最大の特徴として、表1に示すように、鉄との反応性が低いという特徴から、主に鉄系金属の加工に用いられることが多い。

表1 CBNとダイヤモンドの特性

特性	CBN	ダイヤモンド	
ヌープ硬度 (GPa)	50	80~120	
熱伝導性 (W/m·k)	1,300	2,000	
熱的安定性	(大気中)	~1,300°Cまで安定	700°Cより酸化
	(真空中)	~1,500°Cまで安定	~1,400°Cまで安定
金属との反応性	Fe, Co, Niとは ~1,350°Cまで反応しない	Fe, Co, Niと共存すると700°Cで黒鉛化開始	

2. CBN焼結体とは

CBN、則ち窒化 (N) ホウ素 (B) はダイヤモンド＝炭素 (C) の周期律表の両隣の元素から構成される高硬度材料で、ダイヤモンドに次ぐ硬度を有し、粉末状（砥粒）のモノがHPHTプ

ロセスで合成される。焼結体に先駆けて、このCBN砥粒を用いて研削砥石等が製品化されていた。CBNは硬度では、ダイヤモンドの劣るものの、その最大の特徴として、表1に示すように、鉄との反応性が低いという特徴から、主に鉄系金属の加工に用いられることが多い。

てしまうため、合成プロセス同様にHPHTプロセスが必須である。更に、CBNを焼結するには、CBN粒子間の結合強度と焼結体全体の強度を向上させるために結合材を用いることが一般的で、この結合材の選定とそのレシピ開発こそが、CBN焼結体材料の歴史そのものとも言える。

3. CBN焼結体工具の用途

CBN焼結体は前述の高硬度であって、なおかつ鉄系材料との反応性が低いことから、ダイヤモンドが使えない鉄系材料や超硬工具が刃が立たない材料、加工能率が維持できない高硬度の鉄系材料や難削系の材料に主に用いられている。図1は、被削材料別に分類したCBNの市場を示している。殆どの用途がFeを主原料とした金属で有ることが判る。現在は、自動車部品で多く用いられる焼入鋼の仕上げ加工が最も多い用途となっている。

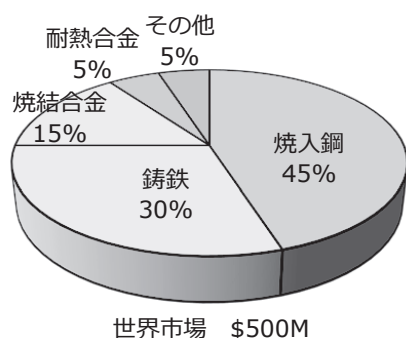


図1 被削材別のCBN工具市場

工具形状面からは、写真1に示すような、旋削用途でスローアウェイチップと言われるものが、市場の過半数を占める工具である。加えて、高硬度で比較的脆いCBN焼結体の弱点である靱性を克服することにより、断続加工となる転削（ミリング）加工用工具も、その後市場で浸透してきた。その工



写真1 CBNチップ



写真2 CBN転削工具（ボールエンドミル）

具例を写真2に示す。

具体的な部品等の名称では、トランスミッション部品のギア、CVT*1のプーリー*2、CVJ*3関連部品、シャフト、ベアリング等の焼入鋼が代表例である。

図1に示すように2、3番目に多い鋳鉄や焼結合金は、鋼に比較して硬度も低く、CBNを採用しなくても従来工具の超硬工具やコーティング工具で十分に加工できる被削材料ではあるが、CBN採用の狙いは、加工能率と加工面品位の向上である。この材料に次ぐ耐熱合金の用途は、航空機部品が主なものであり、そもそも、CBN焼結体が開発されたニーズがこの用途であった。

4. CBN焼結体材質開発の歴史

材料の開発には、普通は、参考となる論文、学会資料等が存在し、研究者の知見が世の中にあふれているが、多大な費用をHPHTプロセスに要するPCDやCBN焼結体材料には、殆どそのような資料が存在しなかった。参考となるのは、自らの基礎実験、データハンドブックと切削実験が教えてくれた、刃先と寿命であった。試行錯誤的に近い実験と研究から、新材質、コンセプトが生まれ、そして進化してきた。下記には、年代と世代別にその開発の歴史について記載する。

4-1 開発初期（1970年代）

CBN焼結体を弊社では「スミボロン®」という商品名で初代のCBN焼結体であるBN200（材質名）から呼称してきている。この名称は言うまでもなく、“スミ”は住友から、“ボロン”はCBNの構成元素のホウ素の英語名に由来する造語である。開発責任者はタフマックスといったゴルフボールやスポーツ用品のような名前を検討していたらしいが、当時の役員の思いでこの言葉になったと聞いている。当時の責任者もそうであるが、筆者もこの“ボロ”という言葉が開発者にとっては、「性能がボロボロ」をイメージさせ当初はあまり愛着が持てなかったが、現在は業界の一部ではCBN工具の代名詞にもなっている。

そもそもHPHTプロセスを用いてCBN砥粒を再度、焼結体とする製造法を始めたパイオニアは、世界で初めてダイヤモンド合成に成功した当時のGE社（現在は欧州工具メーカーのグループ）である。GE社が開発した“BZN”というCBN焼結体はCo金属を結合材として焼結した材料であり、用途は耐熱合金の切削加工であった。図2に示すように、CBN焼結体は大きく2種類に分類できる。上記のCoを結合材として用いたCBN高含有率タイプと、セラミックスを結合材としたCBN焼結体があり、後者のセラミックス結合材タイプが当社オリジナルとして開発し、CBN焼結体工具の用途を焼入鋼加工へと発展させ、飛躍的に需要を拡大させた材質である。

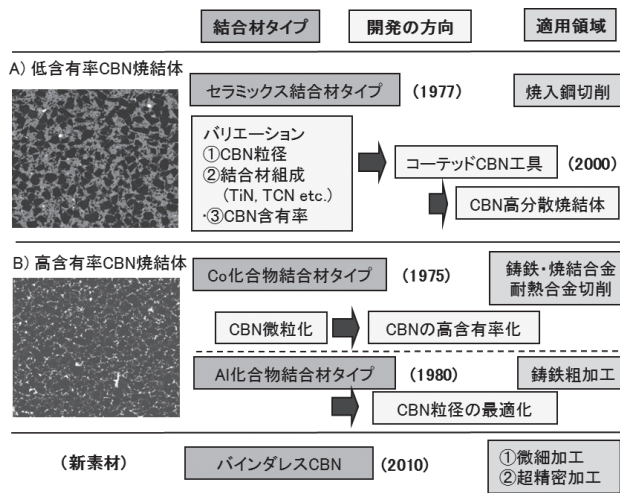


図2 CBN工具開発の歴史

弊社のスミボロン®BN200 (CBN焼結体商品化第一号) は1977年11月30日に新聞発表を行い、そこから、スミボロン®の応用の歴史が始まる⁽¹⁾。当時の開発では、現在と違い、超高压プレス装置の開発と、その必要なHPHT条件の圧力5GPa、温度1500℃以上の条件を安定的に発生させる技術開発との両輪で材質開発が行われてきた。弊社がパイオニアである、セラミックス結合材のCBN焼結体のコンセプトが生まれた背景のキーワードは“耐熱性”であった。Co金属よりも、高硬度で焼結性が良い材質を探索した結果、窒化物系や炭化物系のセラミックスが登場することになった。その中でも、TiN (窒化チタン) 系が選択されたのは、工具として重要な要求特性である熱伝導率にも着目した結果でもある。BN200をはじめとしてその後の材質においても、TiNだけでなく、さらに結合力を高めるために、アルミ (Al) も添加し、CBN粒子とTiN結合材粒子の界面にAlN、AlB₂やTiB₂を生成させている。

この開発当時に、ある日本の自動車メーカーが焼入鋼の研削加工を切削工程に置換するという研究を行っており、これ

にタイミング良くドッキングできたことも、今日のCBN焼結体工具の誕生の大きな要因となった。また、この焼入鋼切削 (ハードターニングと呼ばれる) という技術は日本発の世界初の技術となった。

この技術の実用化の展開はその後の第二次オイルショックもあり、70年代後半は停滞したが、80年代前半に米系の自動車メーカーに採用され、更に日系自動車メーカーでの採用が拡大してきたこともあり、この頃には、ハードターニングとCBN焼結体 (スミボロン®) は広く認知されるような技術と製品に育っていった。

図3は地域別のCBN焼結体の売上のトレンドを示したグラフである。その後、追従する形で欧州にこの技術が浸透していった。今日の加工技術の殆どは欧州発であるということは過言ではない程、この業界は欧州先行型であるが、その中で、ハードターニング技術は日本発の技術として、非常に大きな用途拡大と技術革新を成し遂げた、誇るべき技術ではないかと考える。

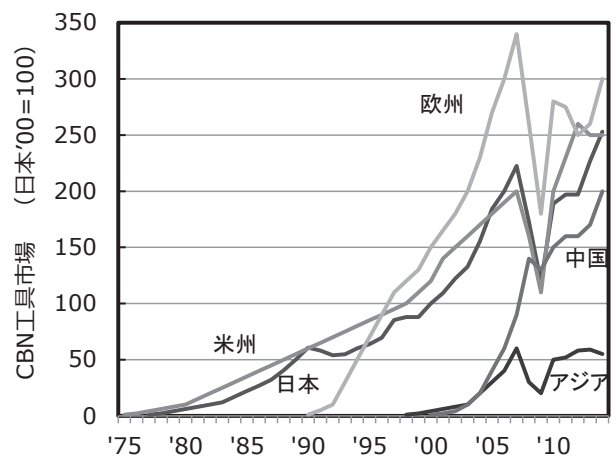


図3 地域別CBN工具市場

4-2 80年代～2000年まで

前述したが、スミボロン®の開発の第2世代は、そのレシピ、材質設計を極限まで高めた時代と言える。

開発初期、CBN焼結体工具はおもに、旋削の用途で、なかでも、連続切削 (部品に穴等の断続がない) に多用されており、当時の課題としては、欠損の問題が残っていた。量産部品の生産で必須の安定寿命という命題に応えることができるのは、まだ限定的な用途であった。筆者はこのポストBN200の開発から研究に携わり、大きな命題として、耐欠損性の向上、断続切削用途でも使える材質とその工具形状開発を行ってきた。ターゲットはギアやシャフトの加工であった。当時はCBN砥石等でそのような部品を加工していたが、加工時間が長いとか、ポイントで加工が可能な切削と違い自由度が

制限されるとか、スラッジ^{※4}の処理等の環境問題への取り組みといった課題が多くあり、CBN工具による切削の実現のための取り組みを行ってきた。

その結果、断続用途として、1986年にBN300、1988年にBN250の開発に成功し、**図4**に示すように、その用途を拡大させることができた⁽²⁾。

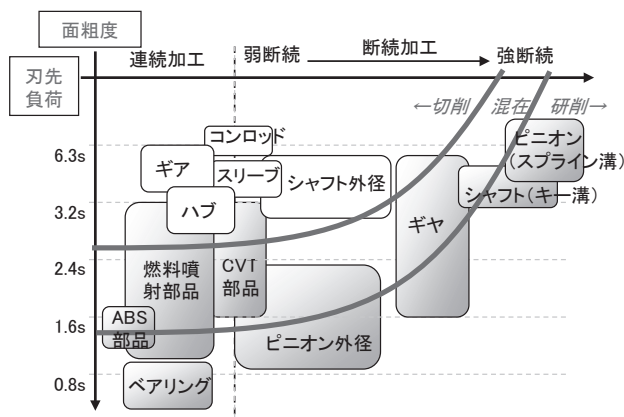


図4 用途の拡大

その後90年代のスミポロン[®]開発の取り組みは、同じく**図4**の縦軸に示すような、加工面の面性状の向上であり、仕上げ面粗度が従来はRyで3.2Sが限界であったところを、CBNの微粒化や特殊結合材の開発により、1.6Sレベルまで可能としてきた。面粗度については並行して、工具形状そのものをワイパー形状にしたり、刃先処理と加工品位を向上させたことも、大きく性能向上に寄与した。この取り組みにより精密部品である、燃料噴射関連の部品や、ベアリングの最終仕上げまでも適用されることになった。

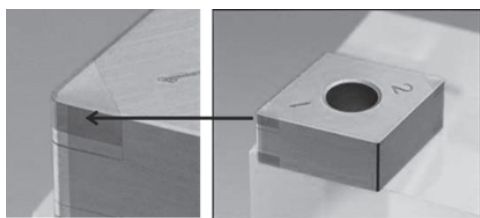


写真3 CBNワイパーチップ

また90年代初めは、CBN焼結体工具の転削工具への展開が加速した時代であり、弊社としても、鋳鉄の超高速加工用CBNフライス工具やハードミリングとなる捻れ刃付きエンド

ミルやボールエンドミル等の製品化が相次いで行われ、球面加工や高精度加工への適用が加速した。たとえば、CVJ部品の球面加工やベアリング部の転動面加工である。このような用途への適用には、弊社のような工具メーカーの取り組みだけでなく、ユーザー側の取り組み（部品の加工面品位の研究およびその適用への尽力）があってこそその結果であると言える。**図5**にその一例を示すが、加工面の変質の有無、応力解析等が切削加工部品の信頼性を裏付ける証となった⁽³⁾。

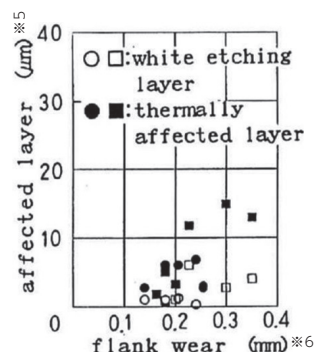


図5 摩耗と加工変質層の相関

材質の話に戻るが、当時は種々の用途に対して、多岐にわたって結合材の材料を検討し、TiNのような窒化物だけではなく、TiC、TiCNをベースとした炭化物やHf（ハフニウム）を用いた化合物、さらには、更に耐熱性を持たせるために、酸化物系の結合材を有するCBN焼結体の開発も行ってきた。この開発によって、焼入鋼の用途以外にも、超高速での鋳鉄加工や焼結金属の仕上げ加工用途において、CBNの適用が拡大し、加工メーカーの能率向上、品質向上に寄与してきた。

4-3 2000年以降

先に、CBNは鉄との反応性がダイヤモンドに比較して低いと記載していたが、それが、酸化物を筆頭にセラミックスと比較して十分なものとは言えないことは、CBN焼結体のCBN含有率が比較的低含有率タイプで最適な耐摩耗性が得られること、則ちCBNの量が少ないほど耐摩耗性が良好となることから間接的に証明できていた。ただ、セラミックス工具自体でCBN焼結体同様のハードターニングを実施すると、欠損、摩耗が加速して実用化に供される用途は限定的であったことも事実である。

切削に使用される工具材料は、被削材に対して通常はその硬度は3倍の値が必要だと言われている。焼入鋼の硬度はHvで700前後であるから、工具材は2000以上の硬度が必要となる、則ち、通常の焼結助剤を含むセラミックス工具では限界に近い低硬度であることになる。一方でTiCやTiAlNといった超硬工具のコーティング皮膜の組成は、単体では2500の

HV硬度を超える値になっており、超硬工具の飛躍的な寿命向上に貢献した技術である。また当時弊社では、PVD※5法で、ZXコーティングという高硬度セラミックス膜を開発しており、これらの組み合わせでCBN焼結体工具をコーティングすることを思いついた⁽⁴⁾。写真4はそのコーティッドCBNと称する工具の事例である。

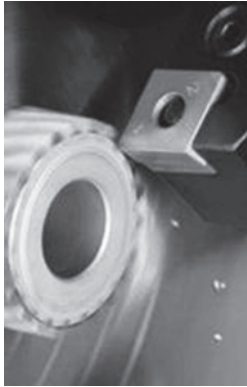
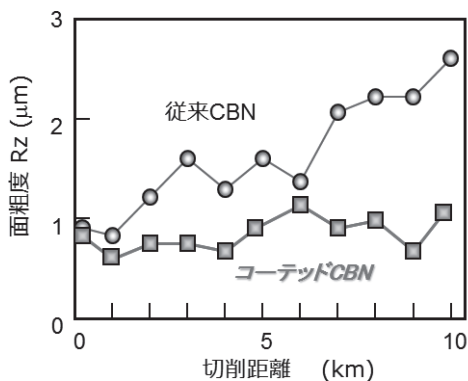


写真4 コーティッドCBN工具の事例

コーティングの組成によって、高速加工での逃げ面摩耗の低減や、さらに摩耗形態そのものを変化させ面粗度を改善して高精度加工用途での長寿命化ももたらすことが可能となった。図6はその実験結果を示したものである。現在では、すでに、コーティッドCBNのTA（スローアウェイチップ）が主流となってきている。



被削材: SCM435 HRC58-62
 工具: 4NC-CNGA120408
 条件: Vc=170m/min, ap=0.1mm, wet
 f=0.05, 0.06, 0.07 mm/rev.
 ワーク4ヶごとに送り変動

図6 コーティッドCBN工具の事例

5. CBN焼結体の将来

金属加工市場の競争は激化しており、高精度、高能率加工、難削材加工の要求はますます強く、CBN工具に対する期待も大きくなっている。この要求に対して、粉末プロセス、焼結プロセスの革新による新規の材料開発、CBN加工プロセスの革新による工具形状開発が進められている。さらに、工作機械メーカーとの協業により新規の金属加工方法も開発され、より大きな付加価値が生み出されている。

材料では超高压プロセスそのものの革新により結合材のない100%CBNからなるバインダレスCBNが開発されている。このバインダレスCBNは従来の約1.5倍の超高压、高温で焼結することにより製造が可能となり、高硬度、高熱伝導等の優れた特性を有する。これらの特性を生かして、図7、図8に示すようにバインダレスCBNは医療用難削材（CoCr合金）加工、金型超精密加工、鋳鉄超高速加工で従来では達成できなかった高精度の加工を実現する。

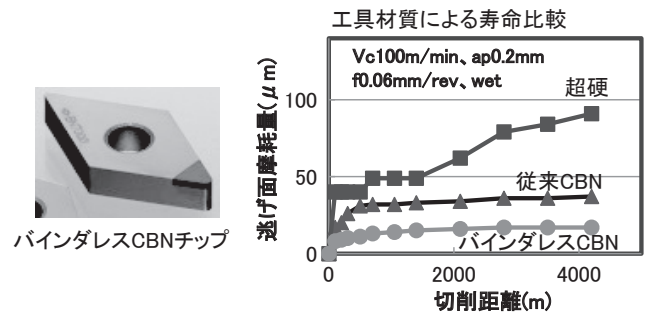
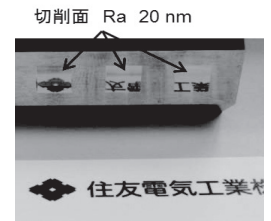


図7 バインダレスCBN工具による医療用CoCr合金の加工



バインダレスCBN
極小径ボールエンドミル



超精密金型

図8 バインダレスCBN工具による焼入鋼金型の超精密加工

工具形状開発では今後三次元の曲線刃先を有する工具の開発が進むと予想される。弊社は世界に先駆けて1996年にねじれ刃を有するCBNエンドミルを製品化している。しかしCBN焼結体は加工が難しいため、おのずとその形状には制約がある。近年、レーザー加工等の新規のCBN刃先創生技術が開発されており、この制約を打ち破って、複雑形状の刃先を有し、切削抵抗の抑制等で従来にはない加工ができる新規工

具の開発が期待される。

新加工方法ではハードスカイピングといわれる高能率高精度加工が開発されている。この加工方法では焼入鋼のシャフトの高精度加工が従来の5~10倍の高能率で実現でき、工作機械メーカーも専用の加工機を開発しており、今後、実用化が進むことが期待される。

このように、CBN工具にはまだまだ多くの可能性が秘められており、市場のニーズに応じて新規工具が開発され、その適用領域を拡大していくことが期待される。

6. 結 言

約40年に亘るCBN焼結体、スミボロン®の研究開発の概略歴史を上記に徒然と記載してきたが、実際には書ききれない程の、開発者の思想、アイデアがその根底に流れていると思う。

若干禅問答的になるが、切削工具としての材質開発、スミボロン®の開発には、その取組みの途上で、「偶然とも言える必然」と「必然とも言える偶然」が混じり合い製品が生み出され、また進化してきたように思える。CBN焼結体の用途は、加工技術の中では、重要で難易度が高い用途であり、工具メーカーだけでなく、顧客である加工メーカーと工作機械メーカーの3者の技術開発が今後もその発展には必須であり、それがより深く、研究され、諦めずに開発が継続され、更なる産業の発展の底辺として寄与できたらと祈念する。

用語集

※1 CVT

Continuously variable transmissionの略。無段変速機。

※2 プーリー

回転動力を伝達する目的でベルトの運動を受け取って回転力を取り出す円盤。

※3 CVJ

Constant velocity jointの略。等速ジョイント。

※4 スラッジ

砥石の砥粒や削り粉が泥状に堆積したもの。

※5 affected layer

加工変質層。加工により表面に生じた内部と異なった層。結晶構造が乱れ、歪や応力が残留する。

※6 flank wear

逃げ面摩耗。

※7 PVD

Physical vapor depositionの略。物理気相成長。物質の表面に薄膜を形成する方法のひとつ。

参 考 文 献

- (1) 原昭夫 他、「スミボロンBN200の性能」、住友電気第113号、p161 (1978)
- (2) 緒方誠夫 他、「スミボロンによる焼入鋼の断続切削について」、住友電気第136号、p192 (1990)
- (3) M. Ogata et. Al, "Einsatz Von PCBN-Werkzeugen in der Produktion," VDI BERICHTE NR. 762, P271 (1989)
- (4) 原田高志 他、「コーティドcBN焼結体工具の開発」、SEIテクニカルレビュー第158号、p75 (2001)

執 筆 者

後藤 光宏* : (株)アライドダイヤモンド
社長



深谷 朋弘 : 住友電工ハードメタル(株)
超高压マテリアル開発部 部長



*主執筆者