鉱物及び石綿含有材料等に関する基礎的な知識

(1)石綿等に関する鉱物の基礎知識

（1）石綿等に関する鉱物の基礎知識

①石綿の種類と定義

②石綿の結晶形態、化学組成、光学的特性

③石綿の類似鉱物や分析妨害物質

石綿（アスベスト）の定義

■ 石綿（アスベスト）は、幾つかの繊維状鉱物の総称で、単一の鉱物名ではないため、鉱物学上の定義はない。

■ 有害性が判明してから、何が石綿で何が石綿でないかが管理上必要となり、世界保健機関(WHO)が定義した（下記）。その際、石綿として産業界が広く使用してきたものを選んだ。その後、各国政府機関等はその定義を踏襲してきた。

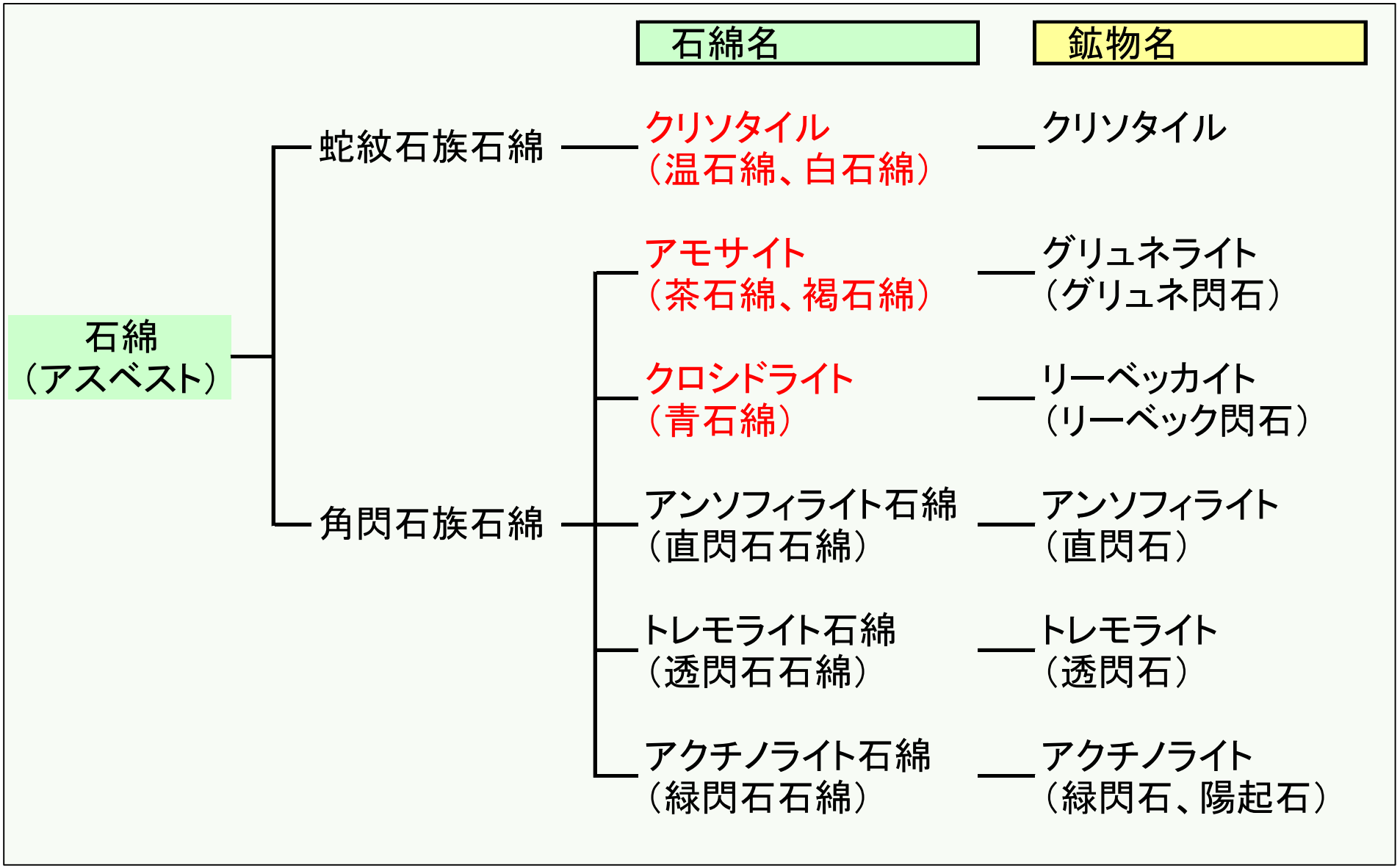
＠ WHO(1973)「アスベストは、天然の繊維状ケイ酸塩鉱物の総称で、クリソタイル、アクチノライト、アモサイト、アンソフィライト、クロシドライト、トレモライトに分類される。」

＠ ILO(1986)「石綿(アスベスト)とは、蛇紋石族造岩鉱物に属す繊維状ケイ酸塩鉱物であるクリソタイル(自石綿)、及び角閃石族造岩鉱物に属す繊維状ケイ酸塩鉱物であ るアクチノライト、アモサイト(茶石綿、カミングトナイトーグリュネライト)、アンソフイ ライト、クロシドライト(青石綿)、トレモライト、あるいはそれらの一つ以上を含む混合物をいう」

＠ 石綿障害予防規則とその施行通達(2005)「石綿とは、繊維状を呈しているアクチノライト、アモサイト(茶石綿)、アンソフイライト、クリソタイル(自石綿)、クロシドライト(青石綿)及びトレモライトをいうこと」

■ 繊維状形態については、浮遊アスベストの位相差顕微鏡法の規定を踏襲し、長さと幅の比（アスペクト比）３以上としている。

石綿の種類：石綿名と鉱物名の比較



日本で主に使われた石綿3種類

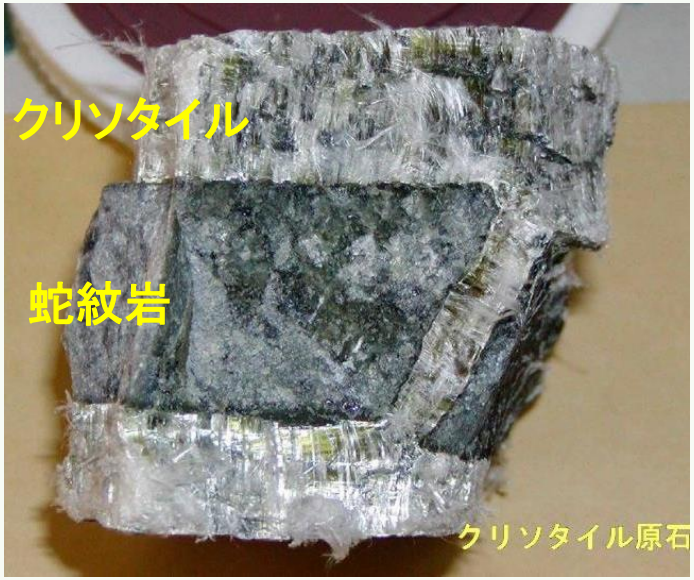
（1）石綿等に関する鉱物の基礎知識

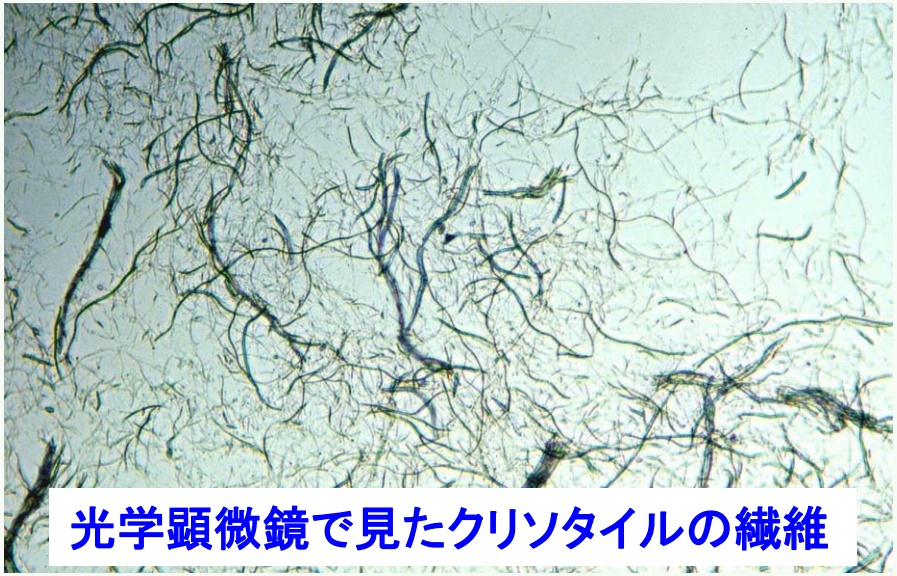
①石綿の種類と定義

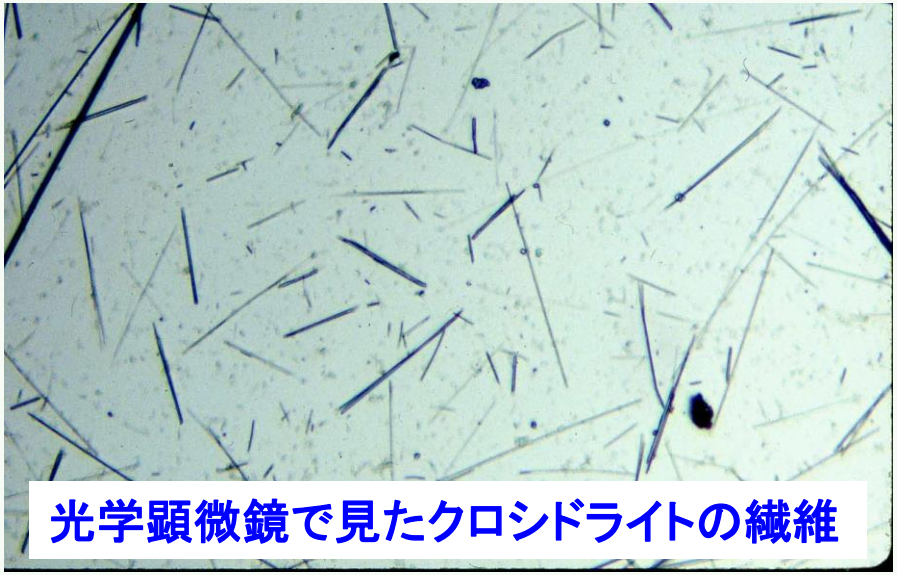
②石綿の結晶形態、化学組成、光学的特性

③石綿の類似鉱物や分析妨害物質

石綿（アスベスト）の繊維状形態




光学顕微鏡で見たクリソタイルの繊維


光学顕微鏡で見たクロシドライトの繊維

アスベストの特徴

クリソタイル（温石綿）：　蛇紋石族に属す石綿。カナダ、ロシア、南アフリカ等に大鉱山があった。世界中で最も多量（8割以上）に使用された石綿。

アモサイト（茶石綿）、クロシドライト（青石綿）：　角閃石族に属す石綿。南アフリカに大鉱山があった。日本も輸入して使用した。

アンソフィライト石綿：　角閃石族に属す石綿。フィンランドに鉱山があった。日本ではあまり使われなかった。

トレモライト石綿、アクチノライト石綿：　角閃石族に属す石綿。トレモライト石綿は、イタリア、ギリシャ、韓国、台湾等に鉱山があった。

トレモライトは鉄成分が多くなるとアクチノライトに変わる連続固溶体。各々の同定には精密化学分析が必要。通常の石綿分析ではトレモライト石綿／アクチノライト石綿と記して、同じ石綿として扱ってよい。

クリソタイルの産状

- かんらん石や輝石などの有色鉱物から成るかんらん岩(Peridotite)が変成作用によって蛇紋岩化し、蛇紋石ができる。
- クリソタイルは、蛇紋岩化でかんらん岩内に生じた割れ目に霜柱のように結晶成長してできたもの。
- 蛇紋岩地域はプレートテクトニクスで生じた褶曲山脈に広く分布している。かんらん岩などの海洋地殻物質が上昇して海底近くで海水と反応して蛇紋岩化する。地表に露出した褶曲山脈として、日本列島、地中海のキプロス島、イタリア・アペニン山脈、アルプス山脈、ロシア・ウラル山脈、北米・コースト山脈やシエラネバダ山脈、カスケード山脈などがある。それらの地域にはクリソタイル鉱山もある。
- 一方、苦灰岩質大理石から蛇紋石ができる場合もある。そこでは、まず苦灰石からかんらん石ができて、その蛇紋石化作用で蛇紋石が形成される。こうしたクリソタイル鉱山が、南ア・トランスバール地方、米国、インドなどに見られる。

クロシドライトとアモサイトの産状

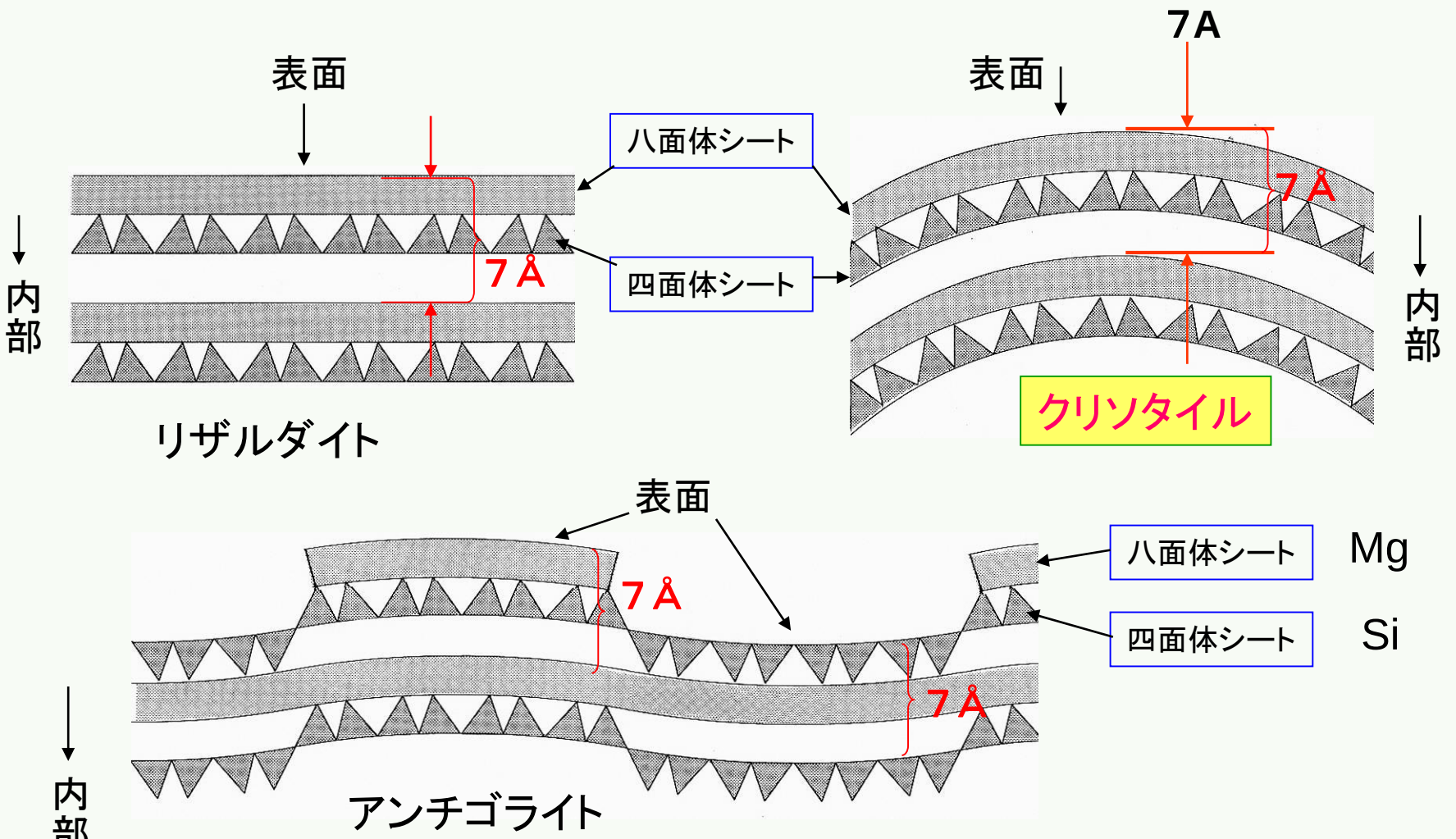
- 角閃石石綿のクロシドライト(リーベック閃石)とアモサイト(グリュネ閃石)は、先カンブリア時代の縞状鉄鉱層中に豊富に産出する。
- ほとんどのクロシドライトとアモサイトは、南アフリカの北ケープ地方とトランスバール地方の先カンブリア紀の縞状鉄鉱層から産出していた。
- この縞状鉄鉱層は地球大気に酸素が無かった頃、バクテリア類の棲息する浅い還元環境の海でゲル状の水酸化鉄とシリカが反応して沈殿・堆積してできたと考えられている。
- 岩石中でNa+の逃散が起ると、クロシドライトはアモサイトに変成する。
  一般にNa+の逃散は温度上昇とともに大きくなるので、クロシドライトのアモサイトへの変成は温度の上昇で促進される（宮野、1983）

石綿の繊維形態と結晶構造

蛇紋石石綿（クリソタイル）

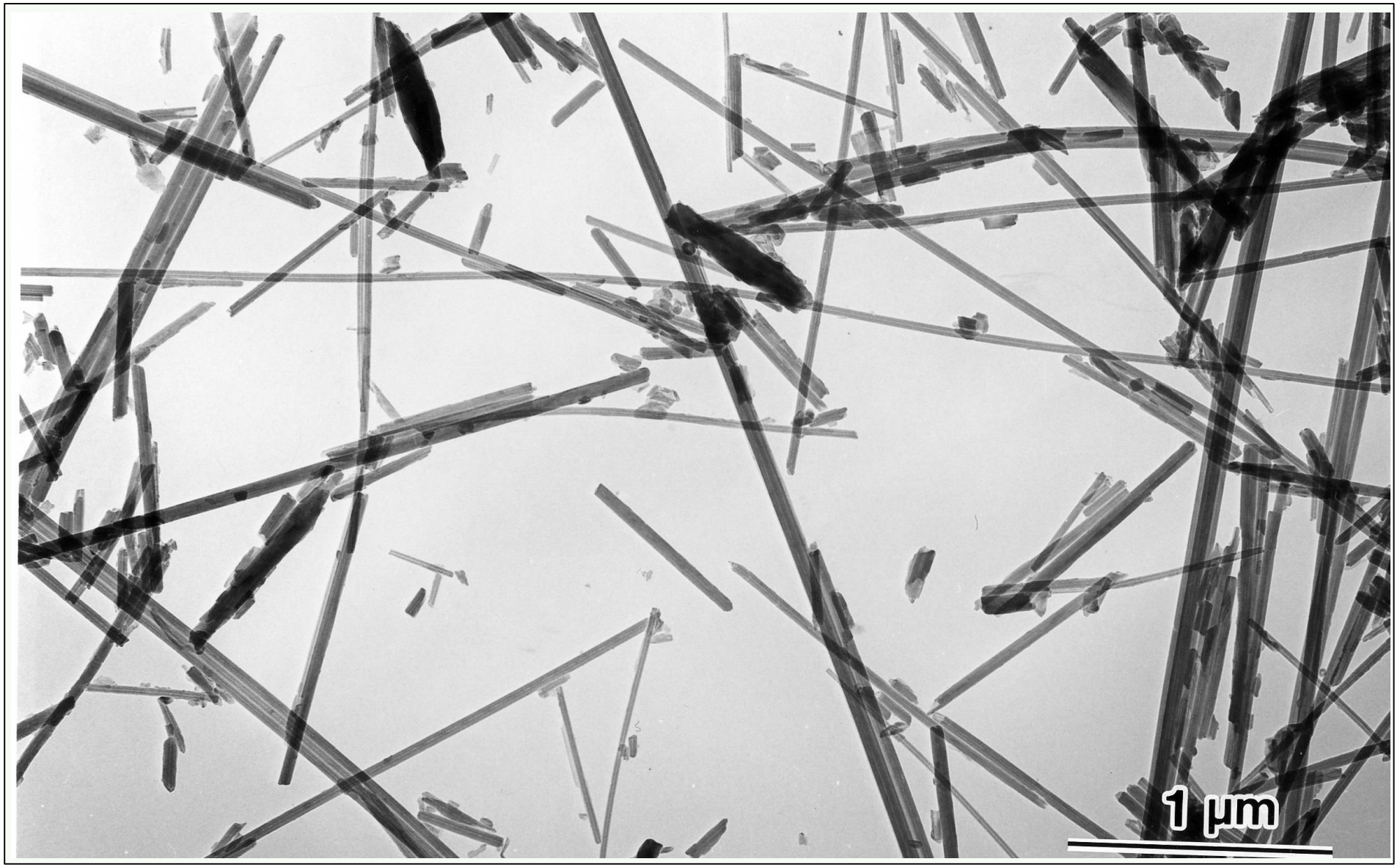
蛇紋石３種

蛇紋石の3つのタイプの結晶構造（結晶横断面の構造）

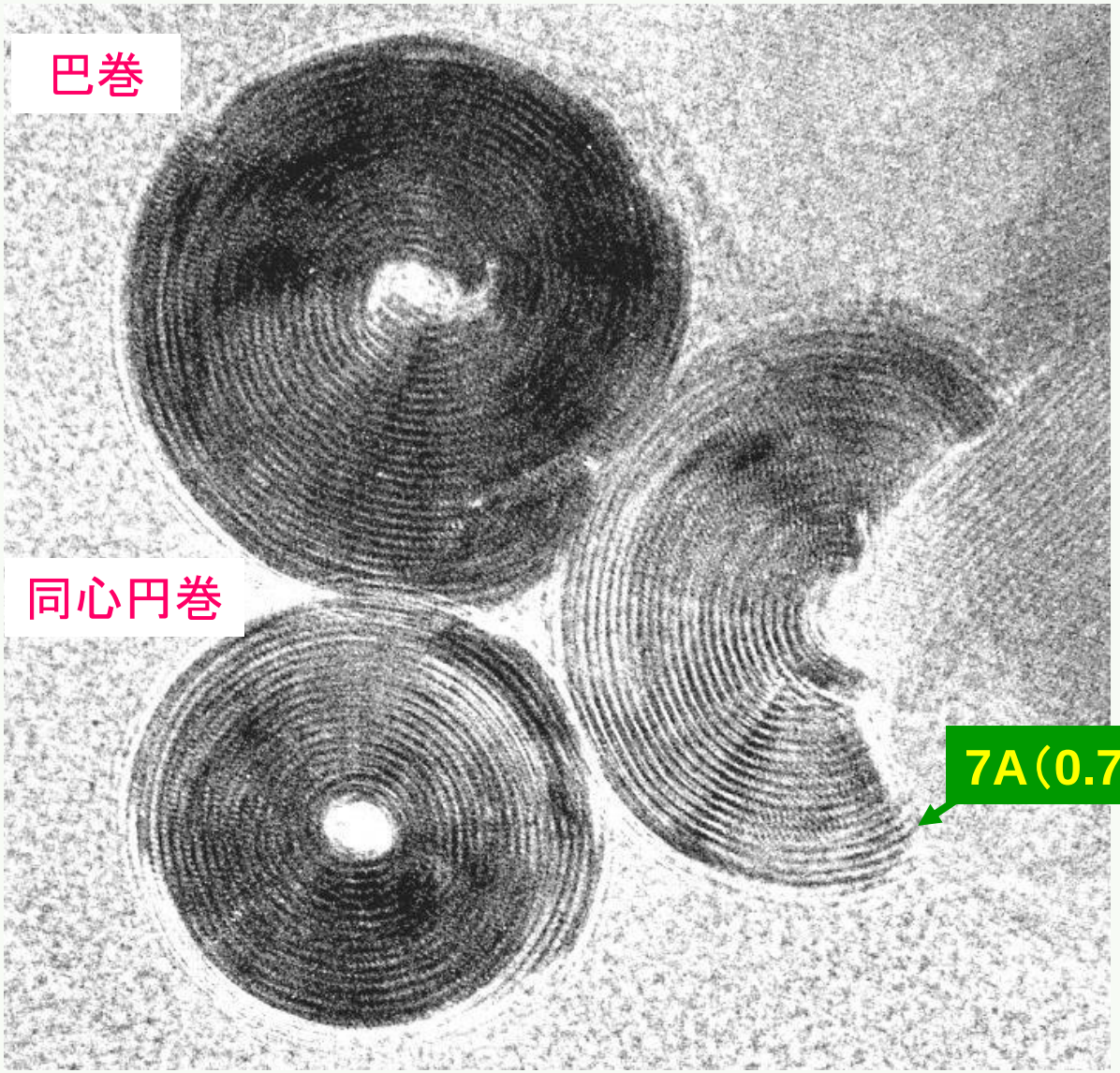


蛇紋石の化学構造式　$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$

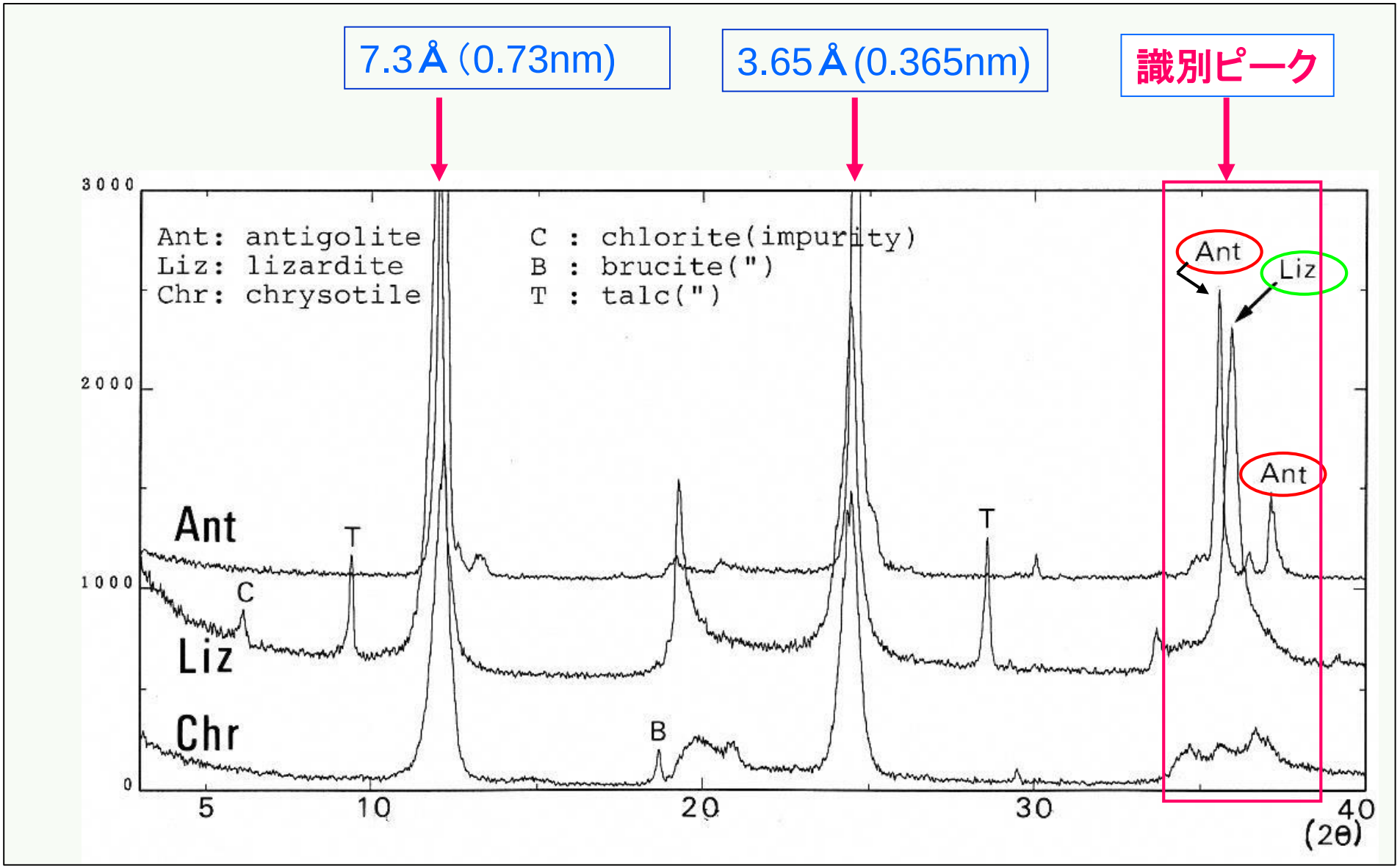
透過電子顕微鏡で見たクリソタイルの繊維形態



クリソタイルの輪切り方向の構造（高分解透過電子顕微鏡で観察）



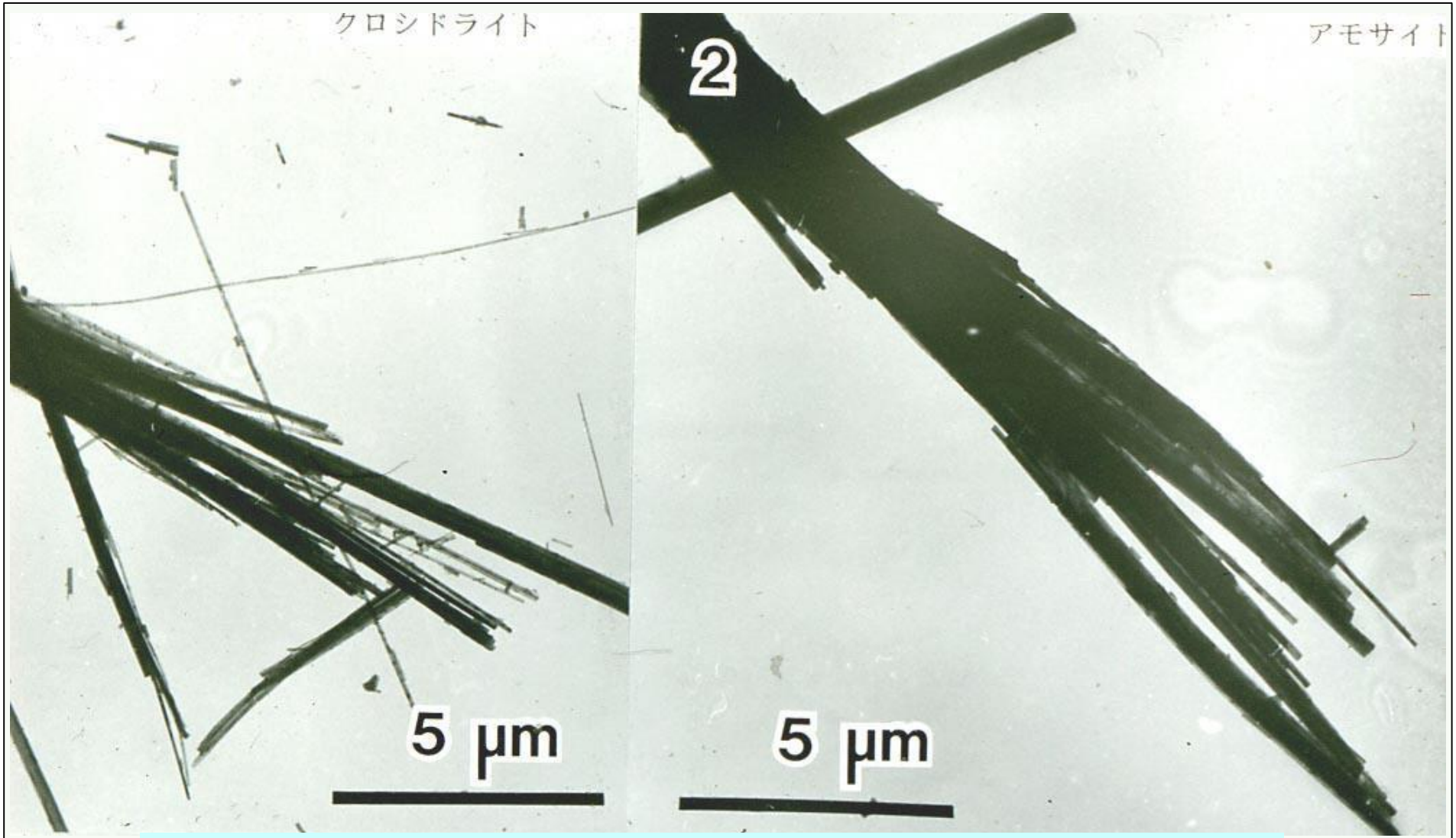
蛇紋石のX線回折パターン



石綿の繊維形態と結晶構造

角閃石石綿

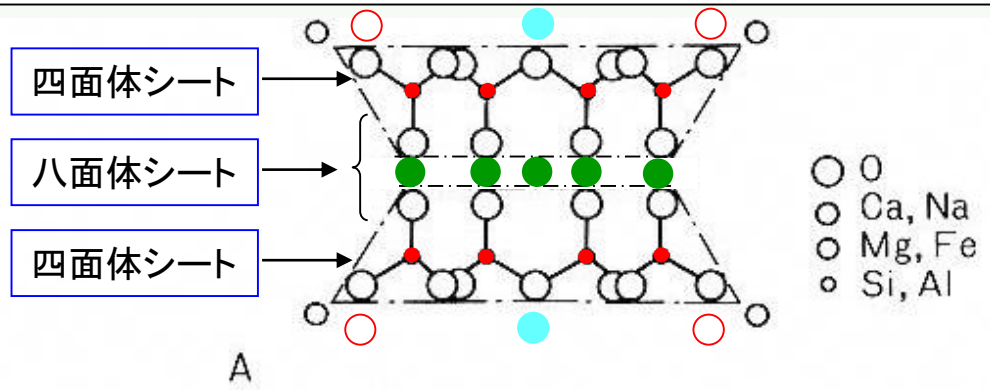
透過電子顕微鏡で見たクロシドライトとアモサイトの繊維形態



クロシドライトとアモサイトの開綿の様子

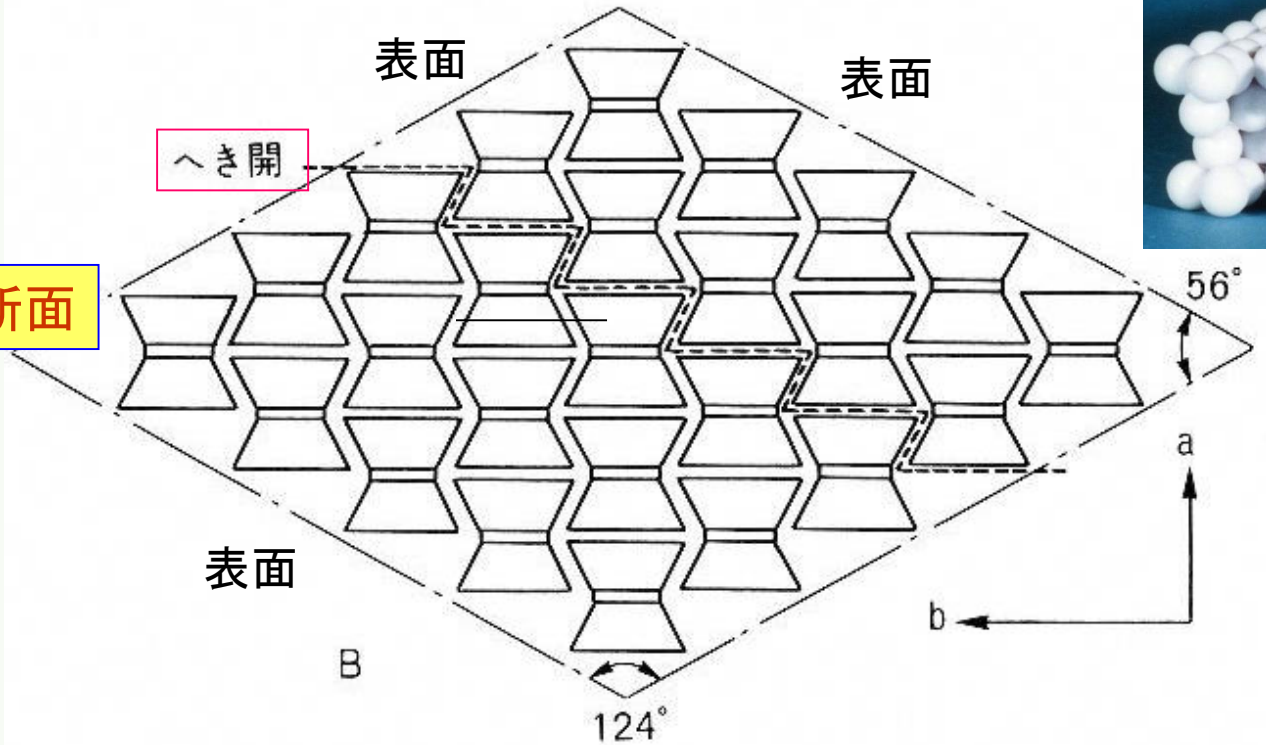
角閃石(amphibole)の結晶構造

角閃石

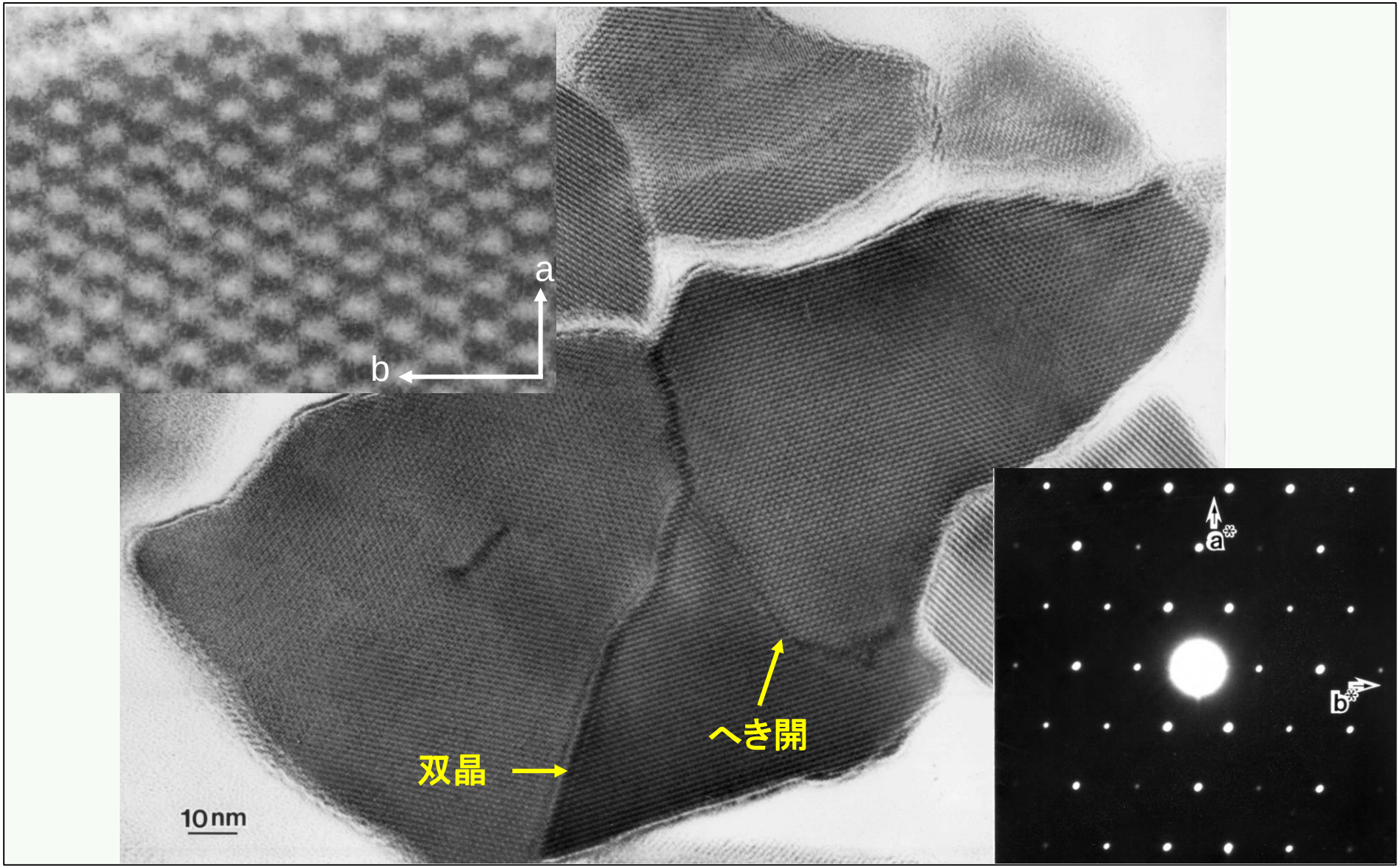


単位胞

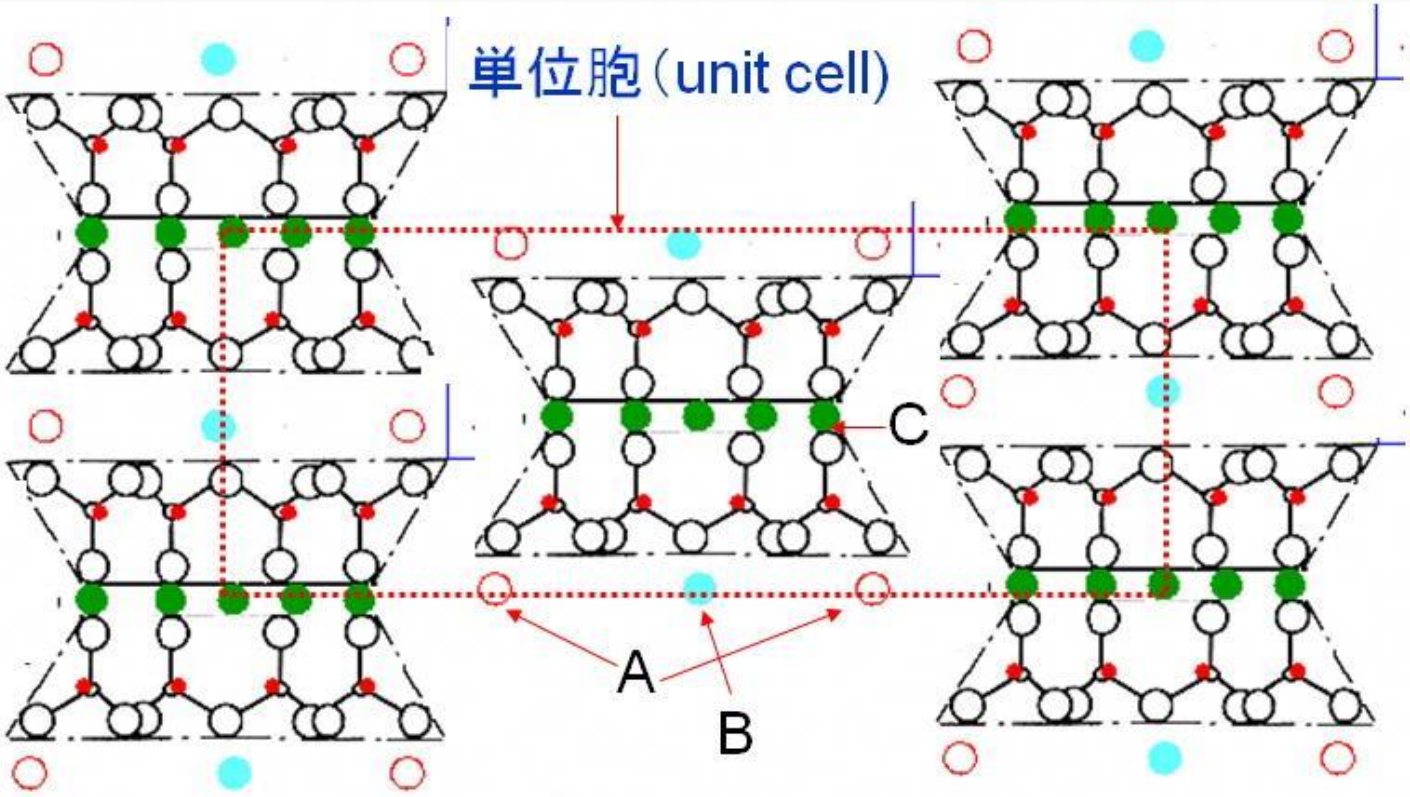
繊維横断面



クロシドライトの繊維断面の高分解能透過電子顕微鏡写真



角閃石の結晶構造 〈繊維軸(C軸)方向から見た構造〉



$A_{0-1}B_2C_5Si_8O_{22}(OH)_2$ ←角閃石の化学構造式

+46　　-46

角閃石アスベスト等の化学構造式

クロシドライト: $Na_2(Fe^{2+},Fe^{3+})_5Si_8O_{22}(OH)_2$

アモサイト: $Mg_2(Mg,Fe^{2+})_5Si_8O_{22}(OH)_2$

アンソフィライト: $Mg_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$

トレモライト/アクチノライト: $Ca_2(Mg,Fe^{2+})_5Si_8O_{22}(OH)_2$

ウィンチャイト: $NaCa(Mg_4,Fe^{3+})_5Si_8O_{22}(OH)_2$

リヒテライト: $Na(Na,Ca)(Mg_4, Fe^{2+})_5Si_8O_{22}(OH)_2$

◎実際にはトレモライト/アクチノライトも若干のNaやKを含んでいるので、
ウィンチャイトやリヒテライトである証明にはNa、Kの正確な定量が必要。

角閃石の種類（76種）

Mg–Fe–Mn–Li角閃石

●斜方晶系

直閃石系列

- 直閃石（anthophyllite）：$\square Mg_7Si_8O_{22}(OH)_2$
- 鉄直閃石（ferro–anthophyllite）：$\square Fe^{2+}_7Si_8O_{22}(OH)_2$
- sodicanthophyllite：$NaMg_7Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- sodic–ferro–anthophyllite：$NaFe^{2+}_7Si_7AlO_{22}(OH)_2$

礬土直閃石系列

- 礬土直閃石（gedrite）：$\square Mg_5Al_2Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- 鉄礬土直閃石（ferrogedrite）：$\square Fe^{2+}_5Al_2Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- sodicgedrite：$NaMg_6AlSi_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- sodic–ferrogedrite：$NaFe^{2+}_6AlSi_6Al_2O_{22}(OH)_2$

ホルムキスト閃石系列

- ホルムキスト閃石（holmquistite）：$\square(Li_2Mg_3Al_2)Si_8O_{22}(OH)_2$
- 鉄ホルムキスト閃石（ferroholmquistite）：$\square(Li_2Fe^{2+}_3Al_2)Si_8O_{22}(OH)_2$

●単斜晶系

カミントン閃石–グリュネル閃石系列

- カミントン閃石（cummingtonite）：$\square Mg_7Si_8O_{22}(OH)_2$
- グリュネル閃石（grunerite）：$\square Fe^{2+}_7Si_8O_{22}(OH)_2$
- マンガノカミントン閃石（manganocummingtonite）：$\square Mn_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$
- permanganogrunerite：$\square Mn_4Fe^{2+}_3Si_8O_{22}(OH)_2$
- マンガノグリュネル閃石（manganogrunerite）：$\square Mn_2Fe^{2+}_5Si_8O_{22}(OH)_2$

単斜ホルムキスト閃石系列

- 単斜ホルムキスト閃石（clinoholmquistite）：$\square(Li_2Mg_3Al_2)Si_8O_{22}(OH)_2$
- 単斜鉄ホルムキスト閃石（clinoferroholmquistite）：$\square(Li_2Fe^{2+}_3Al_2)Si_8O_{22}(OH)_2$
- フェリ単斜ホルムキスト閃石（ferri–clinoholmquistite）：$\square(Li_2Mg_3Fe^{3+}_2)Si_8O_{22}(OH)_2$
- フェリ単斜鉄ホルムキスト閃石（ferri–clinoferroholmquistite）：$\square(Li_2Fe^{2+}_3Fe^{3+}_2)Si_8O_{22}(OH)_2$

Ca角閃石

- 透閃石（tremolite）：$\square Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$
- 緑閃石（actinolite）（端成分でない）
- 鉄緑閃石（ferro–actinolite）：$\square Ca_2Fe^{2+}_5Si_8O_{22}(OH)_2$
- エデン閃石（edenite）：$NaCa_2Mg_5Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- 鉄エデン閃石（ferro–edenite）：$NaCa_2Fe^{2+}_5Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- パーガス閃石（pargasite）：$NaCa_2(Mg_4Al)Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- 鉄パーガス閃石（ferropargasite）：$NaCa_2(Fe^{2+}_4Al)Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- 苦土ヘスティングス閃石（magnesiohastingsite）：$NaCa_2(Mg_4Fe^{3+})Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- ヘスチングス閃石（hastingsite）：$NaCa_2(Fe^{2+}_4Fe^{3+})Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- チェルマク閃石（tschermakite）：$\square Ca_2(Mg_3AlFe^{3+})Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- 鉄チェルマク閃石（ferrotschermakite）：$\square Ca_2(Fe^{2+}_3AlFe^{3+})Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- アルミノチェルマク閃石（aluminotschermakite）：$\square Ca_2(Mg_3Al_2)Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- アルミノ鉄チェルマク閃石（alumino–ferrotschermakite）：$\square Ca_2(Fe^{2+}_3Al_2)Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- フェリチェルマク閃石（ferritschermakite）：$\square Ca_2(Mg_3Fe^{3+}_2)Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- フェリ鉄チェルマク閃石（ferri–ferrotschermakite）：$\square Ca_2(Fe^{2+}_3Fe^{3+}_2)Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- 苦土定永閃石（magnesiosadanagaite）：$NaCa_2[Mg_3(Fe^{3+},Al)_2]Si_5Al_3O_{22}(OH)_2$
- 定永閃石（sadanagaite）：$NaCa_2[Fe^{2+}_3(Fe^{3+},Al)_2]Si_5Al_3O_{22}(OH)_2$
- 苦土普通角閃石（magnesiohornblende）：$\square Ca_2[Mg_4(Al,Fe^{3+})]Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- 鉄普通角閃石（ferrohornblende）：$\square Ca_2[Fe^{2+}_4(Al,Fe^{3+})]Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- ケルスート閃石（kaersutite）：$NaCa_2(Mg_4Ti)Si_6Al_2O_{23}(OH)$
- 鉄ケルスート閃石（ferrokaersutite）：$NaCa_2(Fe^{2+}_4Ti)Si_6Al_2O_{23}(OH)$
- cannilloite：$CaCa_2(Mg_4Al)Si_5Al_3O_{22}(OH)_2$

角閃石の種類（76種）

Na-Ca角閃石

- リヒター閃石（richterite）：$Na(CaNa)Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$
- 鉄リヒター閃石（ferrorichterite）：$Na(CaNa)Fe^{2+}{}_5Si_8O_{22}(OH)_2$
- ウィンチ閃石（winchite）：$\square(CaNa)Mg_4(Al,Fe^{3+})Si_8O_{22}(OH)_2$
- 鉄ウィンチ閃石（ferrowinchite）：$\square(CaNa)Fe^{2+}{}_4(Al,Fe^{3+})Si_8O_{22}(OH)_2$
- バロア閃石（barroisite）：$\square(CaNa)Mg_3AlFe^{3+}Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- 鉄バロア閃石（ferrobarroisite）：$\square(CaNa)Fe^{2+}{}_3AlFe^{3+}Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- アルミノバロア閃石（aluminobarroisite）：$\square(CaNa)Mg_3Al_2Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- アルミノ鉄バロア閃石（alumino-ferrobarroisite）：$\square(CaNa)Fe^{2+}{}_3Al_2Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- フェリバロア閃石（ferribarroisite）：$\square(CaNa)Mg_3Fe^{3+}{}_2Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- フェリ鉄バロア閃石（ferri-ferrobarroisite）：$\square(CaNa)Fe^{2+}{}_3Fe^{3+}{}_2Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- 苦土カトフォラ閃石（magnesiokatophorite）：$Na(CaNa)Mg_4(Al,Fe^{3+})Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- カトフォラ閃石（katophorite）：$Na(CaNa)Fe^{2+}{}_4(Al,Fe^{3+})Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- 苦土タラマ閃石（magnesiotaramite）：$Na(CaNa)Mg_3AlFe^{3+}Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- タラマ閃石（taramite）：$Na(CaNa)Fe^{2+}{}_3AlFe^{3+}Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- アルミノ苦土タラマ閃石（alumino-magnesiotaramite）：$Na(CaNa)Mg_3Al_2Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- アルミノタラマ閃石（aluminotaramite）：$Na(CaNa)Fe^{2+}{}_3Al_2Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- フェリ苦土タラマ閃石（ferri-magnesiotaramite）：$Na(CaNa)Mg_3Fe^{3+}{}_2Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$
- フェリタラマ閃石（ferritaramite）：$Na(CaNa)Fe^{2+}{}_3Fe^{3+}{}_2Si_6Al_2O_{22}(OH)_2$

Na角閃石

- 藍閃石（glaucophane）：$\square Na_2(Mg_3Al_2)Si_8O_{22}(OH)_2$
- 鉄藍閃石（ferroglaucophane）：$\square Na_2(Fe^{2+}{}_3Al_2)Si_8O_{22}(OH)_2$
- 苦土リーベック閃石（magnesioriebeckite）：$\square Na_2(Mg_3Fe^{3+}{}_2)Si_8O_{22}(OH)_2$
- リーベック閃石（riebeckite）：$\square Na_2(Fe^{2+}{}_3Fe^{3+}{}_2)Si_8O_{22}(OH)_2$
- エッケルマン閃石（eckermannite）：$NaNa_2(Mg_4Al)Si_8O_{22}(OH)_2$
- 鉄エッケルマン閃石（ferro-eckermannite）：$NaNa_2(Fe^{2+}{}_4Al)Si_8O_{22}(OH)_2$
- 苦土アルベゾン閃石（magnesio-arfvedsonite）：$NaNa_2(Mg_4Fe^{3+})Si_8O_{22}(OH)_2$
- アルベゾン閃石（arfvedsonite）：$NaNa_2(Fe^{2+}{}_4Fe^{3+})Si_8O_{22}(OH)_2$
- 神津閃石（kozulite）：$NaNa_2Mn^{2+}{}_4(Fe^{3+},Al)Si_8O_{22}(OH)_2$
- nyböite：$NaNa_2(Mg_3Al_2)Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- ferronyböite：$NaNa_2(Fe^{2+}{}_3Al_2)Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- ferric-nyböite：$NaNa_2(Mg_3Fe^{3+}{}_2)Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- ferric-ferronyböite：$NaNa_2(Fe^{2+}{}_3Fe^{3+}{}_2)Si_7AlO_{22}(OH)_2$
- リーキ閃石（leakeite）：$NaNa_2(Mg_2Fe^{3+}{}_2Li)Si_8O_{22}(OH)_2$
- 鉄リーキ閃石（ferroleakeite）：$NaNa_2(Fe^{2+}{}_2Fe^{3+}{}_2Li)Si_8O_{22}(OH)_2$
- kornite：$(Na,K)Na_2(Mg_2Mn^{3+}{}_2Li)Si_8O_{22}(OH)_2$
- ungarettiite：$NaNa_2(Mn^{2+}{}_2Mn^{3+}{}_2)Si_8O_{22}O_2$

バーミキュライトの不純物の繊維状角閃石

- 1970年代・80年代、米国モンタナ州リビーのバーミキュライト鉱山の労働者及び地域住民に中皮腫が発生し、当時の論文で原因は不純物のトレモライト石綿とされていた。
- 2003年に米国地質調査所は、リビー鉱山のバーミキュライトには、石綿の一種であるトレモライトのほかに、繊維状角閃石のウィンチャイトやリヒテライトが含まれていたと論文で明らかにした。
- ウィンチャイト等の生体有害性については、明確な知見がない。しかし、トレモライト石綿と形状、結晶構造及び化学組成が近似している。
- ウィンチャイトとリヒテライトは、X線回折パターンがトレモライトとほぼ同様である。それらの同定には、NaやK、Caの精密な組成分析が必要である。
- 日本の厚労省は、バーミキュライト不純物のウィンチャイト及びリヒテライトは、石綿には該当しないが、分析で区別する必要は無く、石綿に準じて対策を講じることなどを通知した。（平成21年12月28日基安化発1228第１号）

石綿の化学組成
石綿の物理的･化学的特性
石綿の光学的特性

アスベストの化学組成範囲

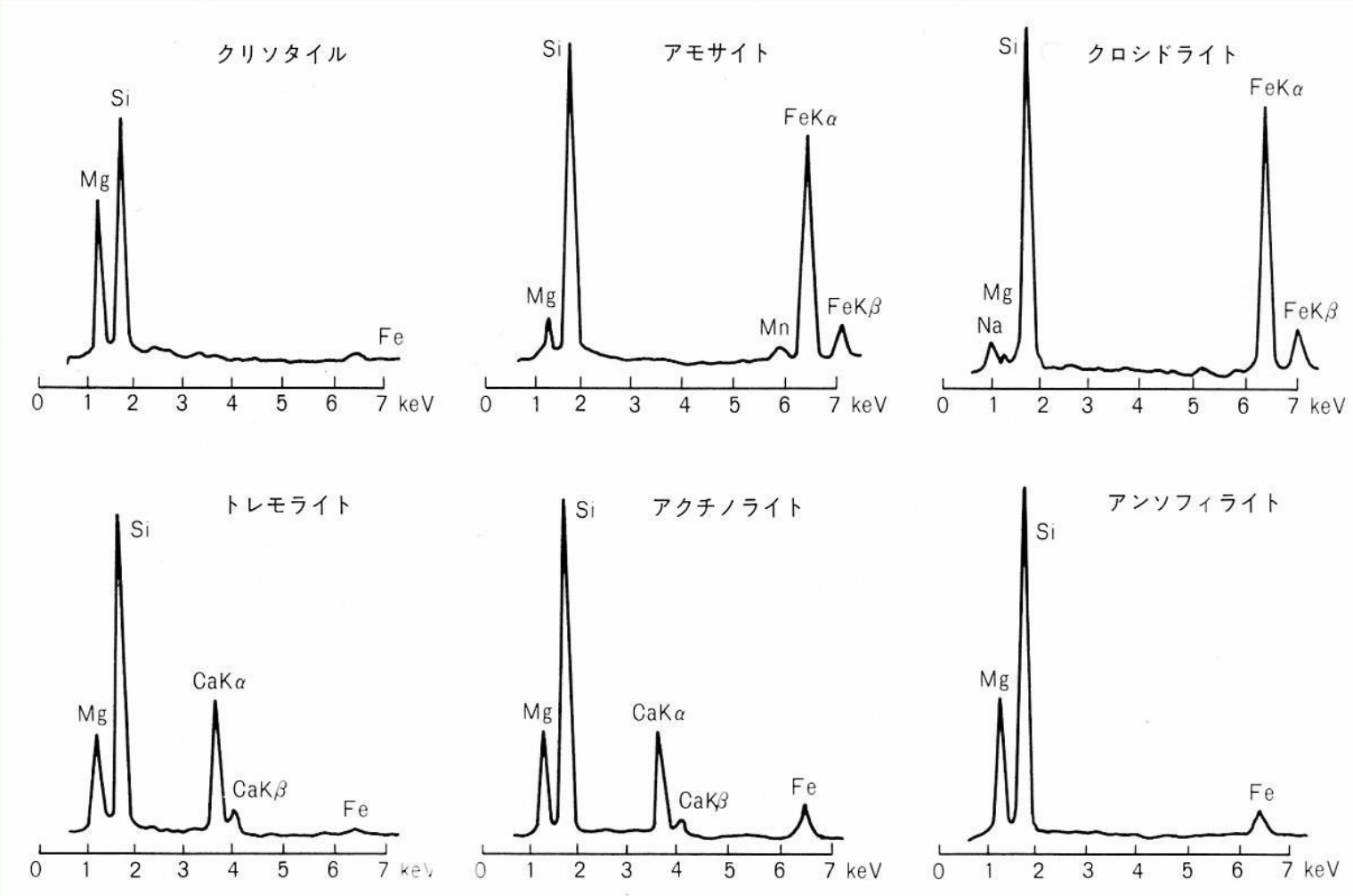
表1　アスベストの化学組成範囲

	クリソタイル	クロシドライト	アモサイト	アンソフィライト	トレモライト	アクチノライト
SiO_2	38～42 (%)	49～56 (%)	49～52 (%)	53～60 (%)	55～60 (%)	51～56 (%)
Al_2O_3	0～2	0～1	0～1	0～3	0～3	0～3
Fe_2O_3	0～5	13～18	0～5	0～5	0～5	0～5
FeO	0～3	3～21	35～40	3～20	0～5	5～15
MgO	38～42	0～13	5～7	17～31	20～25	12～20
CaO	0～2	0～2	0～2	0～3	10～15	10～13
Na_2O	0～1	4～8	0～1	0～1	0～2	0～2
$H_2O(+)$	11～13	1.7～2.8	1.8～2.4	1.5～3.0	1.5～2.5	1.8～2.3

$H_2O(+)$：結晶水

——：識別元素

アスベストのEDXスペクトル



EDXスペクトルの各ピークは元素の種類と量を反映しており、同定に重要。

アスベストの物理的・化学的特性

表2　アスベストの物理的・化学的特性

	クリソタイル	クロシドライト	アモサイト	アンソフィライト	トレモライト	アクチノライト
硬　　度	2.5～4.0	4	5.5～6.0	5.5～6.0	5.5	6
比　　重	2.55	3.37	3.43	2.85～3.1	2.9～3.2	3.0～3.2
比　　熱(kcal/g/℃)	0.266	0.201	0.193	0.210	0.212	0.217
抗　張　力(kg/cm²)	31,000	35,000	25,000	24,000	＜5,000	＜5,00 0
比　抵　抗(MΩcm)	0.003～0.15	0.2～0.5	＜500	2.5～7.5	－	－
柔　軟　性	優	優	良	良～不良	優～良	良～不良
表面電荷 (ゼータ電位)	＋	－	－	－	－	－
耐　酸　性	劣	優	良	優	優	良
弱アルカリ性	優	優	優	優	優	優
脱結晶水温度(℃)	550～700	400～600	600～800	600～800	950～1,040	620～960
耐　熱　性	良,450℃位から脆くなる	クリソタイルと同様	クリソタイルよりやや良	アモサイトと同様	かなり良	アモサイトと同様

比重　クリソタイルが2.6程度で、他は2.9～3以上である。

柔軟性　細く開綿した繊維状態で比較したもので、クリソタイルやクロシドライトが柔らかい。

表面電荷　クリソタイルのみ＋である。

耐酸・耐アルカリ性　クリソタイルは酸に弱い。他は全て酸・アルカリに強い。

耐熱性　繊維が脆くなる温度で示してある。**融点**はすべて1000℃以上。

アスベストの光学的特性

表 3　アスベストの光学的特性

	クリソタイル	クロシドライト	アモサイト	アンソフィライト	トレモライト	アクチノライト
色	無色～淡緑色	青	灰～淡褐色	無色～灰	無色～淡緑色	淡緑色～濃緑色
多色性	無～弱	強	弱	無～弱	弱	強
屈折率 $n\alpha$	1.53～1.56	1.69～1.70	1.66～1.69	1.59～1.69	1.60～1.62	1.62～1.67
屈折率 $n\beta$	1.53～1.56	1.69～1.71	1.68～1.71	1.60～1.71	1.61～1.63	1.63～1.68
屈折率 $n\gamma$	1.54～1.57	1.70～1.72	1.70～1.73	1.61～1.72	1.63～1.65	1.65～1.69
複屈折 $n\gamma-n\alpha$	0.01	0.01～0.02	0.04～0.05	0.02～0.03	0.02～0.03	0.02
消光角	C∧Z＝0～7°	C∧X＝3～21°	C∧Z＝10～15°	直消光	C∧Z＝10～21°	C∧Z＝16～21°

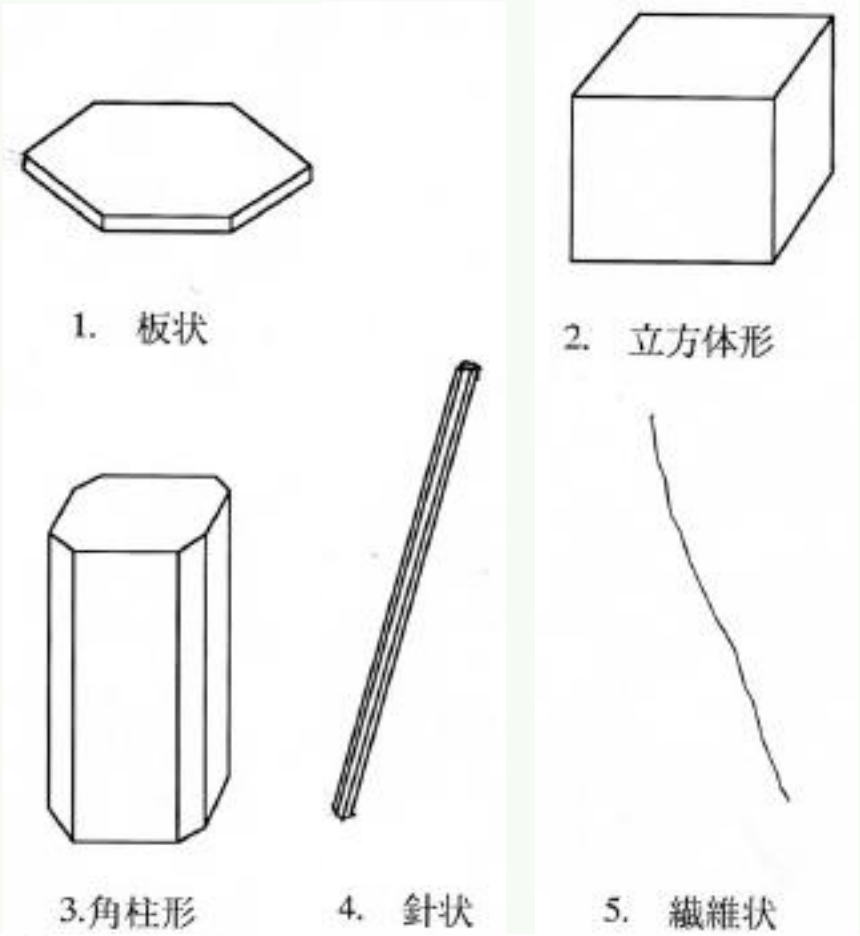
多色性　単二コルでステージを回転すると結晶の色が変化する現象をいう。鉱物ごとに特徴があり、クロシドライトとアクチノライトが強い。

複屈折　直交ニコルでステージを回転させると結晶が色づいたり暗くなったりする（干渉色）。この干渉色は複屈折によって生じる。ステージを回転させたとき、白→灰→黒と変わる結晶は複屈折が小さい。綺麗に色づいて見える結晶は複屈折が大きい。アモサイト以外の石綿の複屈折は総じて小さい。

消光角　直交ニコルでガラスなど（光学的等方体）を見ると暗黒のままで、ステージを回しても常に暗黒である。しかし、かんらん石や輝石、斜長石、石綿など多くの鉱物は、直交ニコル下でほぼ明るく見え、ステージを回転させると1回転の間に4回暗黒（消光位）になる。この消光位が鉱物の結晶軸やへき開方向に一致しているとき直消光（消光角0°）である。石綿はアンソフィライトのみが直消光で、他はある角度で消光する消光角を示す。

石綿の判定
（繊維状形態の確認）

結晶の形の多様性



1. 結晶構造の違い
2. 同一結晶構造でも異なる
   生成環境の違い
   温度、圧力、生成速度、不純物の存在、場の形、その他

鉱物には様々な形がある。古くは結晶の形も重要な分類要素だった。

1930年代にX線結晶学が発達し、結晶構造の解析が進展した。すると、同じ結晶構造でも結晶の形が異なる鉱物が幾つもあることが分かった。例えば、同じ角閃石でも柱状や板状、繊維状などがある。

1950年代になって、化学組成と結晶構造だけで鉱物を分類し、外形は分類要素から外された。

蛇紋石や角閃石には柱状や板状、繊維状といった異なる外形の鉱物がある。それらは結晶構造が同じでも、生成環境が異なるためである。

石綿分析の特徴は繊維状形態を確認すること

- 鉱物学では、鉱物を化学組成と結晶構造で分類し、その形態は用いない。つまり、結晶の形態は鉱物学上の分類には関係しない。
- しかし、産業利用された石綿は、繊維状の形態が用途の物性を決める重要な要素であり、同種の鉱物でも繊維状でないものは「石綿」としては使ってこなかった。
- そのため、石綿は、繊維形態、化学組成、結晶構造の3要素によって判別する。
- 繊維状形態は、顕微鏡（光学顕微鏡や電子顕微鏡）で確認する。
- X線回折分析は、結晶構造に依る回折パターンから鉱物の定性分析ができるが、繊維状か否かは分からないので、石綿分析では石綿と同じ結晶構造の鉱物として把握する。その上で繊維状形態を光学顕微鏡や電子顕微鏡で確認して、石綿の有無や量などを計る。

石綿分析における繊維状の定義

石綿の「繊維状」の定義は、分析マニュアルで規定しており、アスペクト比３以上となっている。

・ 建材中（含有分析）のアスベスト：

  ・ 分析マニュアル（厚労省）：アスペクト比３以上

  ・ JIS A 1481-2, 3 (2017)：アスペクト比３以上

  ・ ISO22262：アスペクト比20以上

【参考】浮遊アスベスト（気中測定）：

  ・ 長さ5μm以上、幅3μm以下、アスペクト比3以上の繊維状粒子。

  ・ 幅の上限3μmは、WHOが吸入性繊維として追加した（1992）。

石綿の種類の判定を行う方法

●石綿（アスベスト）種の判定

(1) 光学的性質：光学顕微鏡（実体、偏光、位相差・分散）
(2) 化学組成　：分析電子顕微鏡（EDX、EPMA）
(3) 結晶構造　：X線回折分析
(4) その他の物理化学特性：蛍光顕微鏡、顕微赤外・ラマン分光法

●石綿（アスベスト）形態の判定

形態（晶癖）、アスペクト比：光学顕微鏡（実体、偏光、位相差・分散）、
電子顕微鏡法（SEM、TEM）、レーザー顕微鏡、
デジタルマイクロスコープ　など

●欠点：
(1) X線回折分析を除き、いずれも微小領域、または局所分析
(2) 鉱物についての知識、熟練が必要

（1）石綿等に関する鉱物の基礎知識

①石綿の種類と定義

②石綿の結晶形態、化学組成、光学的特性

③石綿の類似鉱物や分析妨害物質

石綿以外の繊維状物質

天然鉱物

- 繊維状セピオライト
- アタパルジャイト
- ボラストナイト
- 繊維状ブルーサイト

人造鉱物繊維（MMMF）

- グラスウール
- ロックウール
- セラミック繊維
- ウィスカー類
- カーボンナノ繊維

とくに間違いやすい繊維状物質

- ポリエチレン
- アラミド繊維
- 皮革繊維、クモの糸、セルロース
- 繊維状タルク
- 繊維状ブルーサイト（ネマライト）
- ウォラストナイト
- 珪藻土

など多数

石綿のXRD定量分析における妨害可能性鉱物一覧表

Table 3. Diffraction peaks of quantitative analysis of asbestos and possible interference minerals in building products

	Minerals	ICDD File No.	d (A)	2θ *	I/I1	hkl	d (A)	2θ *	I/I1	hkl
Asbestos	Chrysotile *2Mc 1*	21-543	7,31	12,1	100	002	3,65	24,4	70	004
Minerals(1)	Gypsum	21-816	7,61	11,6	45	020				
	Xonotlite	23-125	6,98	12,7	36	001				
	Lizardite	18-779	7,4	11,9	100	001	3,67	24,2	80	002
	Antigorite	21-963	7,29	12,1	100	001	3,61	24,6	80	002+
	Kaolinite *1T*	14-164	7,17	12,4	100	001	3,58	24,9	80	002
	Halloysite *7A*	29-1487	7,3	12,1	65	001	3,62	24,6	60	002
	Clinochlore *IIb*	7-160	7,14	12,4	80	002	3,57	24,9	100	004
	Sepiolite	26-1226	7,53	11,8	25	130				
	Vermiculite	16-613	7,15	12,4	15	004	3,56	24,9	25	008
	Minerals	ICDD File No.	d (A)	2θ *	I/I1	hkl	d (A)	2θ *	I/I1	hkl
Asbestos	Grunerite (Amosite)	17-725	8,33	10,6	100	110	3,07	29,0	80	060,310
	Riebeckite (Crocidolite)	19-1061	8,4	10,5	100	110	3,12	28,6	55	310
	Tremolite	13-437	8,38	10,5	100	110	3,12	28,6	100	310
	Actinolite	25-157	8,47	10,4	70	110	3,143	28,4	70	310
							2,959	30,1	70	-151
	Anthophyllite	9-455	8,26	10,7	55	210	3,05	29,2	100	610,501
Minerals(2)	Calcite	5-585					3,035	29,4	100	104
	Talc	13-558					3,12	28,6	100	006
	Tobermorite	19-1364					3,08	29,0	100	220
							2,98	30,0	65	222
	Xonotlite	23-125					3,08	29,0	65	110

(1) & (2): Possible interference minerals of chrysotile and amphibole asbestos, respectively. *: Copper target, Ka line.

ICDD File No.: Diffraction data compiled by Joint Committee on Powder Diffraction Standards-International Center for Diffraction Data, Mineral Powder Diffraction File Data Book 1980.

セピオライトとアタパルジャイト（パリゴリルスカイト） 非石綿

セピオライトとアタパルジャイトは、非石綿だが、分析の際にクリソタイルと紛らわしく、注意を要する。

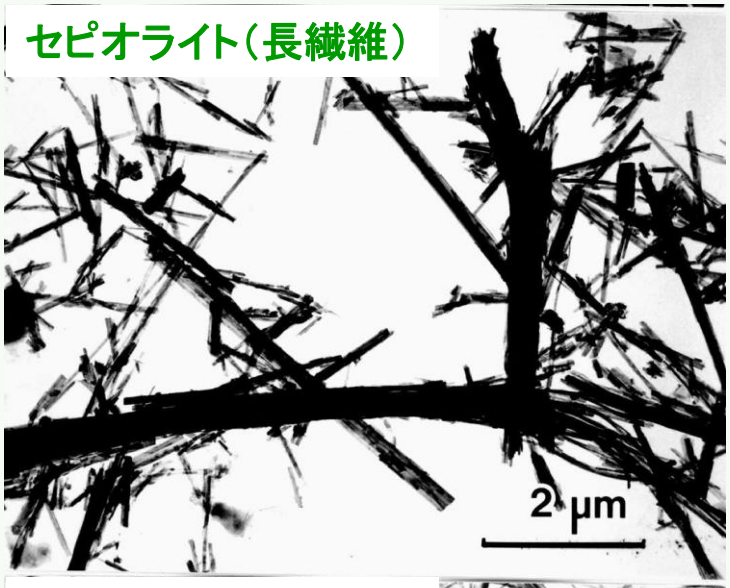
セピオライト

メシャムパイプ

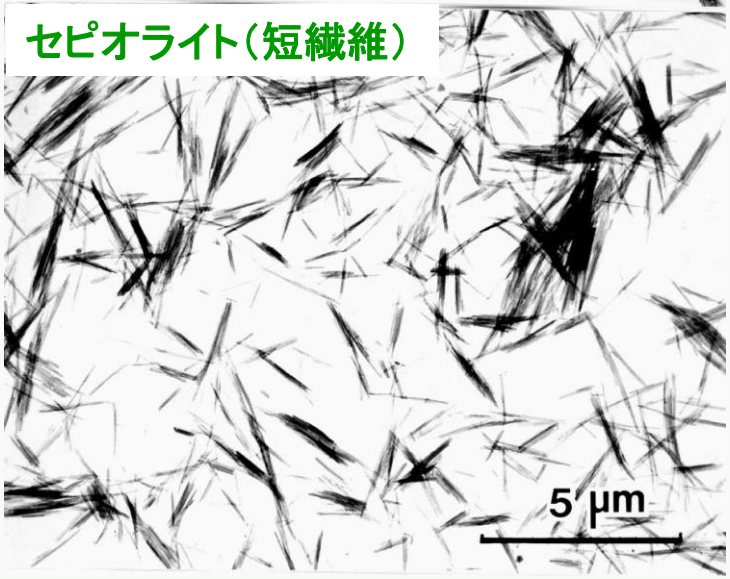
アタパルジャイト
（パリゴルスカイト）

セピオライトとアタパルジャイトの透過電子顕微鏡写真

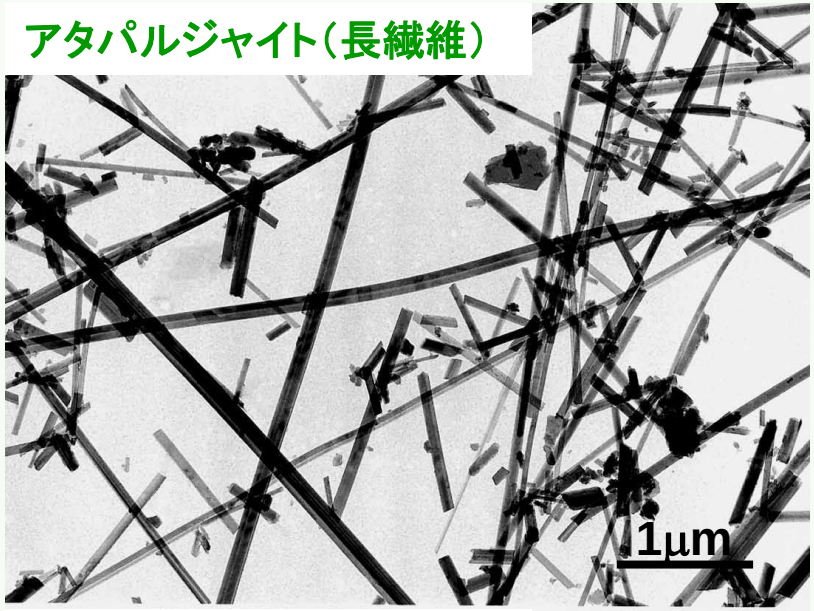
セピオライト（長繊維）



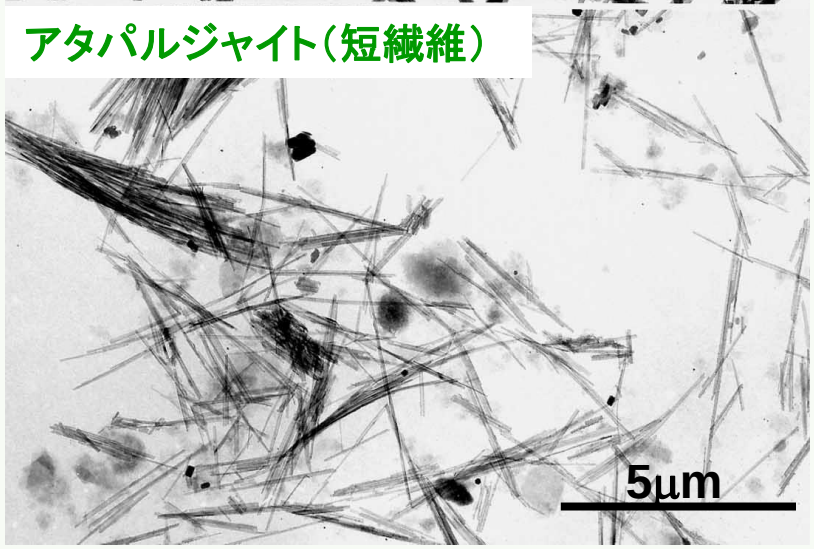
セピオライト（短繊維）



アタパルジャイト（長繊維）



アタパルジャイト（短繊維）



セピオライト・アタパルジャイトの用途

(1)粒状

防臭・・・ペット、養鶏、養豚等の床敷
吸油・・・工場、給油所パイプライン等の油漏れ処理
脱色・精製・脱硫・・・石油精製工業の触媒、グリース、砂糖の脱色、精製コーンオイル
ゼラチンの脱色、ワインの清澄剤
脱水・吸水・・・アルコール、油中の脱水、乾燥剤
不純物除去・・・タバコフィルター、自動車排ガス処理、合成化学工業での不純物除去

(2)粉状～微粉状(長繊維～短繊維)

増粘剤・・・各種樹脂の増粘、ワックスの固化
除菌・・・醤油、酒の除菌及び排水の浄化
バイオリアクター・・・酵素、酵母、微生物の担持体

(3)短繊維状

流動性改善・・・コンクリート圧送、不定形耐火物、ボーリング泥水(地熱発電)
付着性改善・・・吹付用モルタル、吹付用耐火物
エマルジョンの安定化・・・化粧品、ゆう薬、インク、塗料、離型剤などの沈降防止、
タレ止め、水ガラス、でんぷんの安定化
徐放性、固結防止剤・・・農薬、肥料
フィラー・・・ゴム、プラスチック
バインダー・・・耐火物、鋳物砂固化
軽量化・露結防止・断熱性・・・建材

その他、石綿代替

タルク（滑石）の特徴

マグネシウム系ケイ酸塩鉱物で粘土鉱物の板状結晶の一種。
組成式：$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$

蛇紋石($Mg_3Si_2O_5(OH)$が熱水変質、あるいは、
苦灰石($CaMg(CO_3)$が接触変成してできる。

タルク自身は板状結晶であるが、クリソタイルやトレモライト石綿／アクチノライト石綿を不純物として含むことがある。

タルクの利用

- プラスチック：充填材(剛性、耐熱性、寸法安定性の向上)、結晶核剤
- 製紙：填料、ピッチコントロール剤、塗工剤
- 塗料：体質顔料(粘度・光沢の調整)、粉体塗料
- 電子部品：積層板、成形品、レジストインキ、接着剤
- セラミックス：陶磁器の釉薬、ハニカムセラミックス原料
- ゴム：充填材(耐熱性、補強性等の向上)、離型剤
- 化粧品：ファンデーション、ボディーパウダー、アイシャドウ、口紅
- 医薬品：錠剤の賦形剤、滑沢剤
- 食品：ガムベース、製造助剤（くっつき防止）
- 農業：肥料の固結防止剤、農薬のキャリアー

全国タルク協議会HP