



### キーワード

リチウム鉱石サンプル中の微量元素の高感度分析と主要元素の精確な分析

### 概要

高分解能 ICP-OES のデュアルビュープラスにより、サブ ppb レベルから % レンジまでの幅広いリニアダイナミックレンジを実現

### 対象読者

鉱石サンプルのリチウム含有量を商業目的で測定する鉱業または探鉱関連企業

## 高分解能 ICP-OES によるリチウム鉱石の分析

### はじめに

リチウムの経済的重要性は増大しており、リチウムイオン電池のようなグリーンエネルギー貯蔵デバイスの作成において重要な役割を果たしています。その結果、リチウムの世界的な需要が高まり、2020 年には欧州委員会が EU 向けに発表した重要原材料リストにリチウムが正式に追加されました。世界的なリチウム資源の主な供給源は、塩田や地熱地帯からの塩水鉱床ですが、その他の重要な供給源としては、粘土、堆積岩、火成岩の一種のペグマタイトがあります。最大のリチウム埋蔵量は塩原鉱床にあるにもかかわらず、ペグマタイトからのリチウム含有鉱物の精鉱が、品位が高く生産コストが低いため、現在のリチウム生産の主な供給源となっています。<sup>[1]</sup>

リチウムを工業用化合物に変換するには、これらの鉱物を加工する必要があります。しかし、加工する前に、リチウムを含む鉱物の主成分と微量成分の状態を把握することが重要です。リチウム含有量が最も重要ですが、他の元素の含有量と濃度によって品質や加工手順が決まります。従来の探査方法は、鉱床を示す地質学的特徴の特定に依存しています。これらの方法は多くの鉱床の特定に成功していますが、リチウムは地殻中に広く分布しており、特定の

地層とは関連性がないため、リチウム鉱床にはあまり有効とは言えません。今日、リチウム探査には、いわゆるバスファインダー元素と呼ばれる、リチウム鉱床の存在を示す地殻中の特定の元素の分析が取り入れられています。これらの元素には、例えばベリリウム、ルビジウム、セシウム、タンタルが含まれます<sup>[2,3]</sup>。バスファインダー元素は、リチウムと化学的に類似した元素の分布に基づいているため、リチウム鉱床のより効果的な探査ツールとなります。これにより、鉱床に通常見られる地質学的特徴がなくても、リチウム鉱床が存在する可能性の高い地域を特定することができます。従来の探査方法は、大規模な掘削と分析を必要とするため、費用と時間がかかります。一方、バスファインダー元素法は、土壌や岩石のサンプルを分析することで、より迅速かつ安価に実施することができます。

近年、リチウム鉱石の分析法として、YS/T 509 シリーズにまとめられた中国標準法が確立されました。これらの標準法は、主に各対象元素（例：Be、Ca、Cs、Fe、Li、Rb、Mn）の異なる試料調製手順（溶融、ホットプレート上での酸分解）を網羅し、試料の分析には 3 つの異なる手法を推奨しています - フレーム原子吸光法、光度法、エチレン

ジアミン四酢酸 (EDTA) との錯形成法。リチウム鉱石中のすべての成分をこれらの標準に従って測定しようとする、非常に時間がかかり、あまり効率的ではありません。

この分析の目的は、YS/T 509 シリーズに記載されている以外の試料調製法を検討し、PlasmaQuant 9100 ICP-OES で分析を行うことにより、リチウム鉱石試料中の主要元素、微量元素、パスマインダー元素の分析手順全体を簡素化し、迅速化することです。この方法では、ICP-OES の多元素分析機能を利用し、測定プロセスの複雑さを軽減します。さらに、Speedwave XPERT マイクロウェーブ試料分解装置を使用し、試料前処理に必要な全体的な時間と酸の量を削減しました。

## サンプルと測定条件

### サンプル前処理

すべての実験器具は、事前に PURELAB システム (18,2 M  $\Omega$  cm, ELGA LabWater, High Wycombe, England) の脱イオン水 (DI) で洗浄しました。試薬は分析用グレードのものを使用しました。開発したメソッドの適用性と精度を検証するため、3種類の認証標準物質 (CRM) を使用しました: OREAS 750 (ペグマタイトリチウム鉱石)、OREAS 753 (ペグマタイトリチウム鉱石)、OREAS 999 (スポジューメン精鉱)。試料は、分解手順ごとに独立した2連で調製しました。

手順 A (フッ酸マスキング無): 各サンプル約 0.1 g を正確に秤量し (0.0001 mg)、分解容器 (DAK100) に入れました。その後 4 ( $\pm$  0.1) mL 硫酸、2 ( $\pm$  0.1) mL フッ酸、1 ( $\pm$  0.1) mL 塩酸、2 ( $\pm$  0.1) mL 硝酸を加えました。混合物を注意深くかき混ぜ、少なくとも 15 分間静置した後、容器を閉めました。speedwave XPERT マイクロウェーブ試料分解装置で段階的に加熱を行いました (210 °C で 10 分保持 (昇温 5 分)、230 °C で 10 分保持 (昇温 2 分)、240 °C で 30 分保持 (昇温 2 分))。その後、発泡や飛散を避けるため、容器を室温 (RT) まで冷却しました。溶液を目盛り付きポリプロピレンチューブに移し、純水で 50 mL に希釈し、遠心分離しました (1125 xg、5 分間)。得られた透明な溶液を直接分析に使用しました。

手順 B (フッ酸マスキングあり): 最初の分解ステップの冷却後、容器を開け、10 mL の飽和ホウ酸溶液を加えました。遊離フッ酸の錯体化は、180 °C で行いました (10 分保持、昇温 5 分)。その後、容器を再び常温まで冷却し、溶液を目盛り付きポリプロピレンチューブに移し、純水で 50 mL に希釈し、遠心分離しました (1125 xg、5 分間)。その上清を直接分析に用いました。

長期安定性試験は、10 検体の各バッチ後に品質管理 (QC) 溶液を分析することで検証しました。この溶液は、単一元素標準溶液を使用して 1% (v/v) 硝酸で調製しました。QC 溶液には以下の濃度の元素を含んでいます: 5mg/L (P)、20mg/L (Ca)、25mg/L (Fe、K、Li)、50mg/L (Mg、Mn、Na、Si)、150mg/L (Al)。

### 検量線

すべての定量分析は、検量線法にて行いました。各元素の検量線範囲は、予想される濃度範囲に基づいて選択しました。表 1 に示すように、各元素について少なくとも 3 種類の検量線用標準溶液を使用しました。選択した検量線用溶液を図 1 に示します。

多元素ストック標準溶液は、単一元素標準溶液および多元素標準溶液 (Merck, Sigma-Aldrich) を用い、ポリプロピレン製チューブを使用して希釈・調製しました。ブランク溶液、検量線用標準溶液および QC 溶液 (表 1 参照) は、1% (v/v) 硝酸で調製しました。QC 溶液は、検量線用標準溶液に使用したものと異なる多元素ストック溶液から調製しました。

表 1: 検量線用標準溶液とQC溶液の濃度 (mg/L)

元素	As, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Cs, Ga, Nb, Ni, Rb, Sb, Sn, Sr, Ta, Ti, Tl, V, W	Al	Ca, Fe, K, Li, Mn	Mg, Na	P
Blank	0	0	0	0	-
Std. 1	0.01	-	-	-	-
Std. 2	0.10	-	-	-	-
Std. 3	1.0	-	-	-	-
Std. 4	-	-	2.5	2.5	-
Std. 5	-	-	10	10	-
Std. 6	-	50	25	25	-
Std. 7	-	100	50	50	-
Std. 8	-	200	-	100	-
Std. 9	-	-	-	-	1.0
Std. 10	-	-	-	-	2.5
Std. 11	-	-	-	-	5.0
QC Std. 1	0.25	-	-	-	0.25
QC Std. 2	-	50	25	25	-

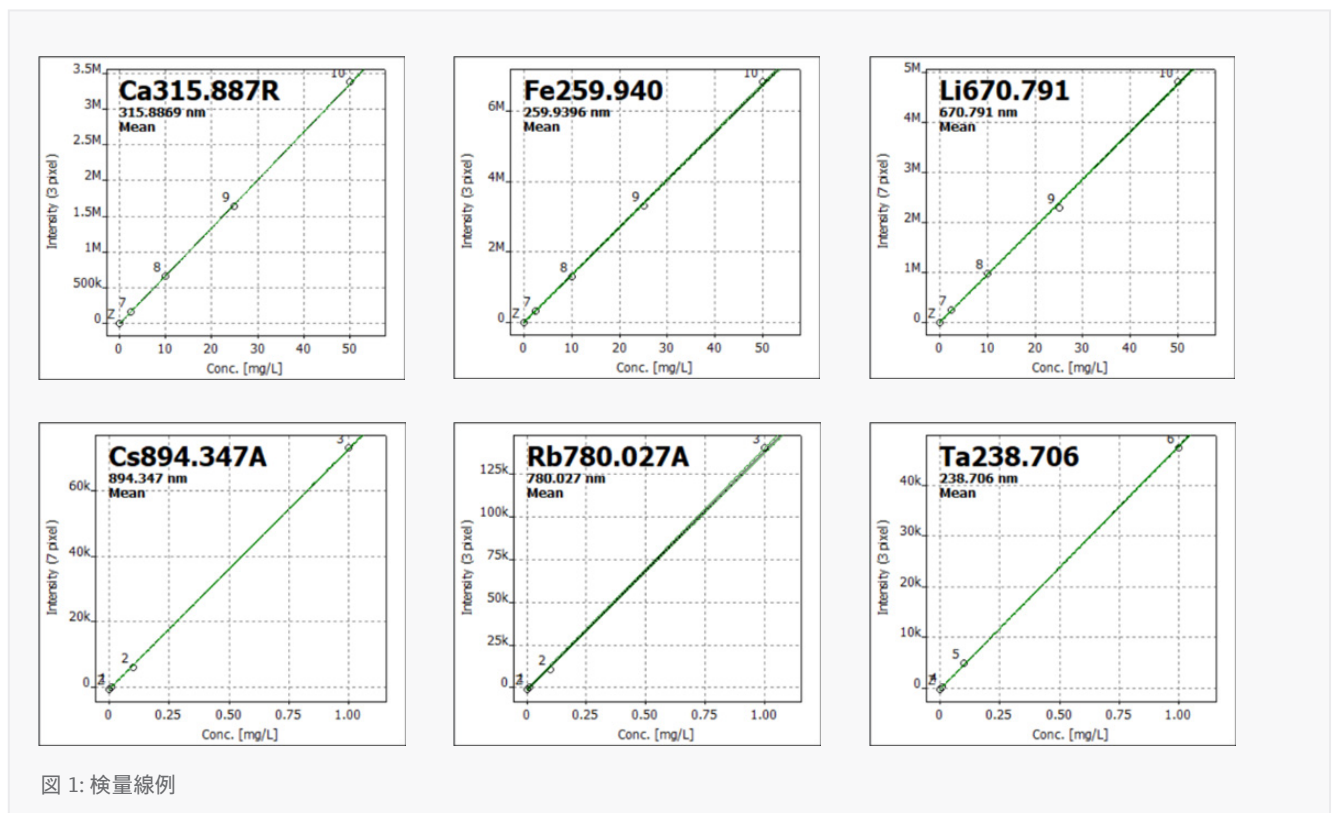


図 1: 検量線例

## 装置

分析には PlasmaQuant 9100 Elite ICP-OES を使用しました。サンプル導入系は、フッ酸に耐性があり、高マトリックスサンプル中の微量元素に対して高い感度が得られるものを選択しました。微量元素と主成分を同時に測定するためにアキシアル、ラジアル、プラスラジアルプラズマ測光モードを選択しました。Teledyne CETAC ASX-560 オートサンプラーも使用しました。個々の設定値と構成の概要を表 2 にまとめました。

表 2: 装置条件

パラメーター	設定値
パワー	1250 W
プラズマガス	13 L/min
補助ガス	0.5L/min
ネブライザーガス	0.6 L/min
ネブライザー	PFAパラレルパスネブライザー、 1.0 mL/min
スプレーチャンバー	PTFEサイクロンチャンバー、50 mL
アウター/インナーチューブ	サイアロン/アルミナ
インジェクター	アルミナ, 内径: 2 mm
ポンプチューブ	PVC (black, black)
サンプル流量	1.0 mL/min
ファストポンプ流量	5.0 mL/min
遅延時間/洗浄時間	60 s/30 s
トーチ位置	0 mm

## メソッドパラメーター

表 3: 測定条件

元素	波長 [nm]	測光方向	積分モード	積分時間 [s]	測定パラメーター			
					ピクセル数	ベースライン補正	多項式次数	補正
Al	396.152	radial	peak	1	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
As	188.979	axial	peak	5	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Be	313.042	radial	peak	1	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Bi	223.061	axial	peak	3	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Ca	315.887	radial	peak	1	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Co	228.615	axial	peak	3	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Cr	267.716	axial	peak	3	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Cs	894.347	axial	peak	3	7	static	auto	-
Fe	259.940	radial	peak	1	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Ga	294.364	axial	peak	3	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
K	766.491	radial	peak	1	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Li	670.791	radial PLUS <sup>2</sup>	peak	1	7	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Mg	285.213	radial	peak	1	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Mn	293.931	radial PLUS <sup>2</sup>	peak	1	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Na	589.592	radial	peak	1	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-



表 3: 測定条件 (続き)

元素	波長 [nm]	測光方向	積分モード	積分時間 [s]	測定パラメーター			
					ピクセル数	ベースライン補正	多項式次数	補正
Nb	269.706	axial	peak	3	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Ni	231.604	axial	peak	3	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
P	213.618	axial	peak	1	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Rb	780.027	axial	peak	5	3	static	auto	-
Sb	217.581	axial	peak	5	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Sn	189.927	axial	peak	3	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Sr	407.771	radial	peak	1	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Ta	238.706	axial	peak	3	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Ti	334.941	axial	peak	1	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
Tl	190.796	axial	peak	5	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
V	292.401	axial	peak	1	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-
W	207.911	axial	peak	3	3	ABC <sup>1</sup>	auto	-

<sup>1</sup> 自動ベースライン補正<sup>2</sup> ラジアル測光を減衰しリニアダイナミックレンジをパーセンテージレンジに拡大

## 結果と考察

ISO 11885に従い、下記の数式で検出限界 (LOD) を算出しました:

$$\text{LOD} = 3 s_0$$

$s_0$  は、試薬ブランクの少なくとも 3 回の分析結果の標準偏差です。前処理段階での希釈倍率を考慮した、装置およびメソッド固有の検出限界 (LOD) と定量下限 (LOQ) を表 4 に示します。

表 4: 装置およびメソッド固有の検出限界 (LOD) と定量下限 (LOQ)

元素	波長 [nm]	測光方向	装置 [ $\mu\text{g/L}$ ]		メソッド [mg/kg]	
			LOD	LOQ	LOD	LOQ
Al	396.152	radial	4.16	12.50	2.08	6.25
As	188.979	axial	3.06	9.20	1.53	4.60
Be	313.042	radial	0.20	0.60	0.10	0.30
Bi	223.061	axial	3.71	11.10	1.85	5.55
Ca	315.887	radial	2.04	6.10	1.02	3.05
Co	228.615	axial	0.25	0.80	0.13	0.40
Cr	267.716	axial	0.12	0.40	0.06	0.20
Cs	894.347	axial	7.16	21.50	3.58	10.75
Fe	259.940	radial	0.55	1.70	0.28	0.85
Ga	294.364	axial	1.58	4.70	0.79	2.35

表4 (続き): 装置およびメソッド固有の検出限界 (LOD) と定量下限 (LOQ)

元素	波長 [nm]	測光方向	装置 [ $\mu\text{g/L}$ ]		メソッド [mg/kg]	
			LOD	LOQ	LOD	LOQ
K	766.491	radial	28.12	84.40	14.06	42.20
Li	670.791	radial PLUS	0.90	2.70	0.45	1.35
Mg	285.213	radial	0.52	1.60	0.26	0.80
Mn	293.931	radial PLUS	2.45	7.30	1.22	3.65
Na	589.592	radial	5.14	15.40	2.57	7.70
Nb	269.706	axial	0.58	1.80	0.29	0.90
Ni	231.604	axial	0.71	2.10	0.36	1.05
P	213.618	axial	7.69	23.10	3.84	11.55
Rb	780.027	axial	0.74	2.20	0.37	1.10
Sb	217.581	axial	6.72	20.10	3.36	10.05
Sn	189.927	axial	1.49	4.50	0.75	2.25
Sr	407.771	radial	0.01	0.02	0.00	0.01
Ta	238.706	axial	4.42	13.30	2.21	6.65
Ti	334.941	axial	0.07	0.20	0.03	0.10
Tl	190.796	axial	2.10	6.30	1.05	3.15
V	292.401	axial	0.19	0.60	0.09	0.30
W	207.911	axial	2.20	6.60	1.10	3.30

メソッド開発と妥当性試験のための分析には、3種類の認証標準物質 (CRM) を使用しました。回収率から、2つの分解手順のうち、どちらの方法がどの元素に最も適しているかがわかります。YS/T 509 シリーズでは、フッ酸と硫酸を使用した酸分解をホットプレートで行います。この方法をスケールダウンしてマイクロウェーブ分解システムに応用し、溶液中で全ての元素を適切に安定させるために、追加の酸を加えるように変更しました。リチウム鉱石にはシリカ、アルミニウムの酸化物、およびそれらの様々な形式や混合物の多くが含まれているため、硫酸、フッ酸、および塩酸の混合物による分解が必要であり、多くの場合、その後のホウ酸による錯体化ステップが必要となります。もちろん、この方法ではほとんど溶解しない沈殿物が多数生じる可能性があります。そのため、追加の錯体化ステップが必要かどうかをテストしました。表5は、各元素の認証値と、フッ酸の錯体化工程を採用した分解手順 (手順 B) と省略した分解手順 (手順 A) による回収量を示します。

表 5: ホウ酸錯体化なし (手順 A) とホウ酸錯体化あり (手順 B) のサンプル調製手順後のサンプルの回収率と認証値の比較

元素	OREAS 750			OREAS 753			OREAS 999		
	認証値 [mg/kg]	回収率 手順 A [%]	回収率 手順 B [%]	認証値 [mg/kg]	回収率 手順 A [%]	回収率 手順 B [%]	認証値 [mg/kg]	回収率 手順 A [%]	回収率 手順 B [%]
Al	54,200	<u>63</u>	93	82,200	<u>28</u>	100	107,700	<u>21</u>	103
As	13.3	102	<u>158*</u>	5.33	99	<u>214*</u>	5.36	111	<u>222*</u>
Be	37.6	106	98	118	93	103	49.8	88	99
Bi	1.00	<MLD	<MLD	2.2	<MLQ	<MLQ	2.11	<MLQ	<MLQ
Ca	8,280	<u>74</u>	95	1,130	<u>22</u>	108	4,500	<u>32</u>	96

表 5 (続き) : ホウ酸錯体形成ステップなし (手順 A) とホウ酸錯体形成ステップあり (手順 B) のサンプル調製手順後のサンプルの回収率と認証値の比較

元素	OREAS 750			OREAS 753			OREAS 999		
	認証値 [mg/kg]	回収率 手順 A [%]	回収率 手順 B [%]	認証値 [mg/kg]	回収率 手順 A [%]	回収率 手順 B [%]	認証値 [mg/kg]	回収率 手順 A [%]	回収率 手順 B [%]
Co	3.99	117	103	0.96	92	94	4.95	91	94
Cr	27.6	98	104	20.8	94	109	81	105	104
Cs	22.6	95	108	64	<u>74</u>	102	88	<u>71</u>	117
Fe	16,700	95	92	8,390	89	97	16,200	91	94
Ga	13	110	<u>270*</u>	16.1	102	<u>252*</u>	82	105	<u>135*</u>
K	16,900	94	93	19,300	88	102	5,000	<u>56</u>	99
Li	2320	86	<u>73</u>	9,850	96	95	26,500	94	88
Mg	3150	<u>22</u>	97	110	<u>12</u>	102	4,100	<u>9</u>	98
Mn	380	97	92	740	98	102	1430	99	97
Na	15,300	95	91	21,600	89	90	6,930	83	94
Nb	21.3	101	100	36.3	97	95	75	93	92
Ni	11.4	105	90	10.8	106	89	47.5	103	94
P	700	105	92	1,110	105	95	160	101	93
Rb	254	51	97	612	97	110	n.c.	-	-
Sb	0.42	<MLD	<MLD	0.27	<MLD	<MLD	1.11	<MLD	<MLD
Sn	25.2	90	103	84	97	99	63	93	103
Sr	74	<u>69</u>	99	25.5	<u>11</u>	105	16.9	<u>40</u>	111
Ta	9.78	101	100	20	105	98	49	92	87
Ti	1,580	93	91	40	<u>79</u>	<u>79</u>	340	95	95
Tl	1.45	<MLQ	<MLQ	3.67	<MLQ	<MLQ	4.26	<MLQ	<MLQ
V	26.4	101	<u>111*</u>	1.16	103	<u>315*</u>	14.8	94	<u>110*</u>
W	5.46	92	<u>72</u>	5.62	94	<u>81</u>	6.97	93	<u>72</u>

\* ホウ酸マトリックスに由来するスペクトル干渉によって引き起こされる分析対象元素の過大評価  
MLD---メソッド検出限界 / MLQ---メソッド定量下限

基本的に、ほとんどの分析対象元素で2つのどちらの試料調製方法を使用しても影響しないと言えます。Al、As、Ca、Cs、Ga、Mg、Sr、V、Wについては、2つの方法の間で回収率に大きな差が見られます。As、Ga、Vについては、ホウ酸マトリックスに起因するスペクトルの干渉が大きい原因です。IおよびII族の元素とAlについては、フッ酸を錯体化する手順が著しく良好な回収率を示していることがわかります。これは、錯体化のステップによって不溶性のフッ化物沈殿 (Al、Ca、Mg など) などの形成がなくなるという事実により説明することができます。さらに、特定の元素 (例えば W) の溶液中の安定性は、フッ化物イオンの存在に強く依存します。それぞれの元素に対して2つの方

法のうちより適切な方法を選択した場合、大部分の元素で86～111%の回収率が得られます。

認証標準物質中のいくつかの微量元素の濃度がメソッド固有の定量下限以下であったため、1つのサンプル (OREAS 750、HF 錯体化なし) に低濃度の標準溶液 (0.1 mg/L) を添加し、メソッド全体の精度と適用性をチェックしました。さらに、マトリックス効果がパスマイニング元素のシグナル強度に影響を及ぼす可能性があるかどうかをテストしました。EN ISO 11885 などの規格手順では、添加された分析元素濃度の回収率は、サンプルに添加された濃度相当量の±20%以内でなければならないことが記載されています。図2は分析対象元素の回収率を示しており、いずれも

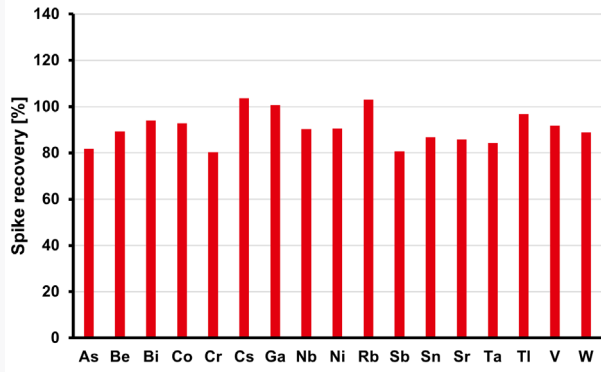


図 2: リチウム鉱石 (OREAS 750) の添加 (0.1 mg/L)回収

± 20%の範囲内であったことから、低濃度の未希釈の鉱石の試料中のパスマインダー元素の測定にこの方法が適用できることが証明されました。

長期安定性は、QC 標準の分析値を 12 時間モニターすることによって調査しました。その結果、回収率は± 10%の範囲に収まりました (図 3 参照)。6.2%以下の相対標準偏差は、12 時間の分析を通して装置の性能が非常に安定していることを示しています。

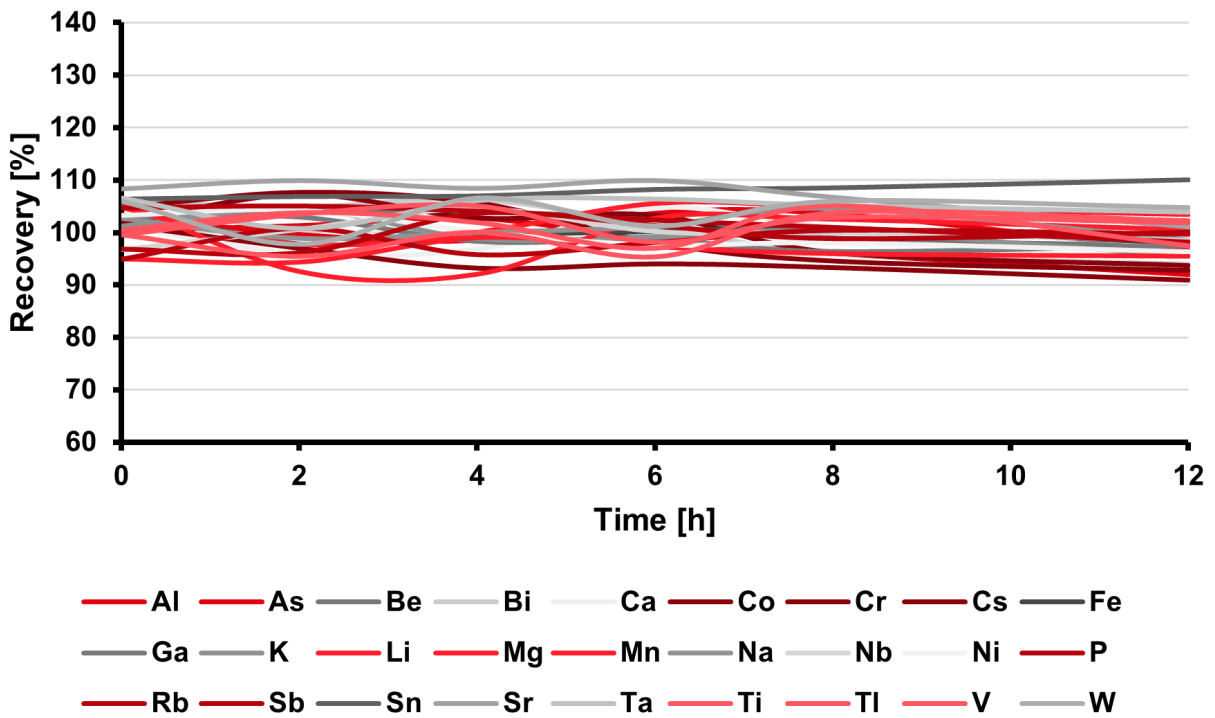
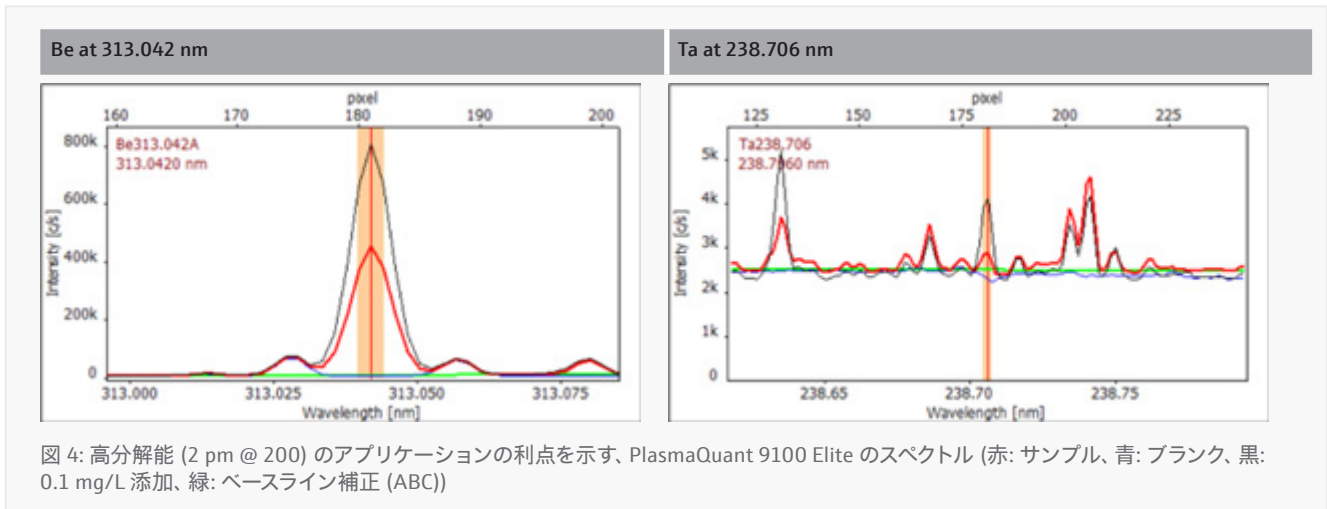


図3: 12時間の連続分析における分析対象元素の回収率

ICP-OES による地質試料の微量成分の分析は、最も困難な分析のひとつです。多くの場合、アルミナ、鉄、シリカ、硫黄、耐火性金属などを多量に含み、マトリックス含有量の高い分解試料では、非常に高いプラズマ堅牢性が要求されます。これは、試料の希釈をできるだけ行わずに、微量レベルの分析対象元素を検出しようとする場合に特に当てはまります。マトリックス元素から生じる膨大な数の発光線がさらに複雑さを増していますが、これは高いスペクトル分解能によってのみ解決できます。装置が高分解能 (2pm @ 200 nm) であるため、深刻な干渉もスペクトル分離することができ (図 4 参照)、その結果、数学的補正アルゴリズムを利用することなく、すべての元素を分析することができます。





## まとめ

ここでは、リチウム鉱石サンプルの分析に高感度と堅牢性を備えた高分解能 ICP-OES を標準的な構成で使用する方法について説明しました。メソッドの妥当性確認は、認証標準物質の分析と長期安定性分析によって行われ、このようなマトリックスの元素分析に対する PlasmaQuant 9100 ICP-OES システムの適合性が実証されました。

主な課題は、1 回の分析で広い濃度範囲 (低  $\mu\text{g/L}$  ~ 高  $\text{mg/L}$ ) の元素を分析することでした。微量元素 (Be、Cs、Rb、Ta など) も主要元素 (Al、Fe、Li、Na など) とともに分析することができました。これは PlasmaQuant 9100 シリーズのデュアルビュープラス機能によって実現できました。一般的なラジアルおよびアキシシャルプラズマ測光モードに加えて、それぞれのプラズマ測光で信号を減衰させる更なる選択肢、プラスアキシシャルおよびプラスラジアルが選択できます。ここでは、ラジアルおよびプラスラジアルプラズマ測光を使用して、1 回の測定で微量パスマインダー元素やターゲット元素と一緒に高レベルの主要元素を測定しました。この方法では、全濃度範囲をカバーできるために数回の希釈を行う必要がありません。これは特に高濃度のリチウムの分析に役立ちます。この元素は、最も高感度で最もよく知られている 670 nm の分析ラインを使用し、希釈なしのサンプルで定量することができました。

分析結果は、マイクロウェーブ分解が全ての元素に使用でき、試料調製を大幅に簡素化できることを示しています。分析元素によっては、メソッドの精度を向上させるために、分解手順にフッ酸の錯体化のための追加ステップを実施することが有利な場合があります。パスマインダー元素と目標元素の鉱石サンプルの分析を



実行するための感度、安定性、精度の面での要件は、このシステム構成で達成できることが実証されました。分析に PlasmaQuant 9100 シリーズを使用し、試料前処理に speedwave XPERT マイクロウェーブ分解システムを使用することは、リチウム鉱石試料のルーチン分析に最適な組み合わせと言えます。

## 推奨する機器の構成

表 6: 装置、アクセサリ、消耗品の概要

品名	品番	内容
PlasmaQuant 9100 Elite	818-09101-2	高分解能 ICP-OES
speedwave XPERT	819-5005000-2	マイクロウェーブ試料分解装置
PlasmaQuant PQ 9000 および PlasmaQuant 9100 シリーズ用耐フッ酸導入系	810-88007-0	HF キット
Teledyne Cetac ASX 560	810-88015-0	オートサンプラー
Teledyne Cetac ASXPress Plus	810-88120-0	全自動6ポートインジェクションバルブと真空ポンプユニット

## References

- [1] Robert J. Bowell et. al.; Classification and Characteristics of Natural Lithium Resources. Elements 2020; 16 (4): 259–264.
- [2] Balaram, V.; Sawant, S.S. Indicator Minerals, Pathfinder Elements, and Portable Analytical Instruments in Mineral Exploration Studies. Minerals 2022, 12, 394.
- [3] Renata Barros et al., Controls on chemical evolution and rare element enrichment in crystallising albite-spodumene pegmatite and wallrocks: Constraints from mineral chemistry, Lithos, 352–353, 2020

この文書は発行時のデータや事実に基づき作成されています。文章内の情報は変更されることがあります。技術的な修正やデータの修正を含め、他の文書がこの文書に優先することがあります。

商標について: アプリケーションプロトコルで指定されているサードパーティ製品のブランド名は、通常、それぞれの会社または組織の登録商標です。